FEBRUAR 2006 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Verhinderte der Mensch eine Eiszeit?

www.spektrum.de

Das Geheimnis der MASSE

Was gibt Teilchen Gewicht und dem Universum Substanz?

MEDIZIN

nature REVIEWS NEUROSCIENCE

Wann ist der Mensch wirklich tot?

ASTRONOMIE

Größtes Fernglas der Welt

INTERNET

Neue Suchmaschinen für das Web

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Freier Wille und der Tod

Liebe Spektrum-Leser,

die zeitweilig erhitzte Debatte um das Thema »Wie frei ist unser Wille?« scheint sich inzwischen gelegt zu haben. Doch die damit verknüpften Grundfragen sind noch keineswegs aus der Welt: Sind wir kausal-deterministisch vorgeprägte Bioautomaten? Oder trifft unser Gefühl zu, dass wir im Wortsinn jederzeit tun und lassen können, was wir wollen? Kann ich also, wie es Michael Springer (ab S. 110) ausdrückt, »den Weltlauf nach Belieben verändern«, oder ist mein freier Wille, da alles kausal erklärt werden kann, nur eine gelungene Illusion? Der Autor unseres Essays, in Wien zum theoretischen Physiker promoviert, heute freier Schriftsteller, Exredakteur und ständiger Mitarbeiter von Spektrum, beginnt mit diesem Beitrag eine Reihe, in der er Grundfragen der modernen Naturwissenschaft aufgreifen wird.

Die bewusste Verfügbarkeit über das eigene Tun gerät vor allem am Ende des Lebens an ihr Extrem. Sterbehilfeorganisationen wie etwa die Schweizer Dignitas gründen bereits Zweigstellen in Deutschland. Hier regeln Patientenrecht und Sterbehilfe jedoch andere Gesetze als in der Schweiz, wo Sterbehilfe unter bestimmten Bedingungen legal möglich ist. Wann darf, soll oder muss man jemandem, der freiwillig aus dem Leben scheiden will, »aktiv« zur Seite stehen? Das ist mehr als nur ein juristisches Thema, weil hier die Medizin, neben den jeweiligen Landesgesetzen, vor dem hippokratischen Gebot der Lebenserhaltung in einen Konflikt mit dem Selbstbestimmungsrecht zumeist moribunder Patienten gerät. Dieser Konflikt eskaliert aber nicht nur angesichts der Furcht vor einer falschen Todesdiagnose durch die Transplantationsmedizin. Er bringt auch regelmäßig Angehörige von Wachkomapatienten, die zum Teil Jahre »an den Schläuchen« hängen, zur Verzweiflung, wie etwa bei der amerikanischen Patientin Terri Schiavo im letzten Jahr. Der Fall schlug hohe Wellen, auch bei Politikern und Kirchenvertretern – und er wird nicht der letzte dieser Art bleiben.

Vermutlich werden sich die widersprüchlichen Forderungen, die an ein Sterben in Menschwürde gestellt werden, nie einvernehmlich ausgleichen oder juristisch so regeln lassen, dass alle zufrieden sind. Wann ist ein Mensch wirklich tot? Überlegungen zur Todesdefinition stellt Steven Laureys in seinem Beitrag an (S. 62). Der belgische Neurowissenschaftler wendet sich genau den Bedenken zu, die aufkommen, wenn der Begriff des Hirntodes etwa den Zustand des Wachkomas mit umfassen soll. In einem ist sich der Forscher sicher: »Es handelt sich hier nicht um eine rein medizinische Angelegenheit.«

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

ANZEIGE

INHALT

SPEKTROGRAMM

12 Heißer Eisplanet · Nanopyramiden aus DNA · Klimmzüge im Karussell · Trauriger Treibhausrekord · Urzeitlicher Riesenskorpion u. a.

15 **Bild des Monats**
Zu Fuß durch die Eiszeit

FORSCHUNG AKTUELL

16 **Von Qubytes und untoten Katzen**
Neue Rekorde bei der Verschränkung von Atomen

20 **Trügerische Traumfigur** 🔊
Wie sich dem Gehirn eine schlanke Taille vorgaukeln lässt

22 **Asymmetrische Eselsohren**
Lichtgetriebene Reaktion unterscheidet zwischen Spiegelbildern

24 **Als die Tropfen laufen lernten** 🔊
Elegantes Antriebssystem für Nanoroboter

THEMEN

28 MEDIZIN
Chlamydien-Infektionen 🔊

▶ 36 TITELTHEMA PHYSIK
Das Geheimnis der Masse

▶ 44 KLIMAGESCHICHTE
Früher Treibhauseffekt durch den Menschen 🔊

▶ 54 TELESKOPE
LBT – neuer Blick ins All

▶ 62 MEDIZINETHIK
Hirntod und Wachkoma

▶ 82 INTERNET
Die Nachfolger von »Google«

90 EPIDEMIOLOGIE
Pocken und Vogelgrippe im Computer

110 ESSAY
Freier Wille

Titelbild: Jede Masse ist von einem Schwerefeld umgeben, durch das sie andere Materie anzieht. Doch woher die »schweren« Elementarteilchen ihre Masse haben, darüber rätseln die Physiker bis heute
von: Corbis-Zefa / Josh Westrich

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet;
die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe:
www.spektrum.de/audio

SEITE 28

MEDIZIN

Chlamydien-Infektionen – die heimliche Seuche

Weltweit gehören Chlamydien-Bakterien zu den häufigsten Ursachen für vermeidbare Erblindung und Unfruchtbarkeit. Forscher suchen nach Möglichkeiten, den in Zellen versteckten Erregern beizukommen

SEITE 44

KLIMAGESCHICHTE

Stoppten die ersten Bauern eine Eiszeit?

Schon in der Jungsteinzeit rodete der Mensch großräumig Wälder und begann mit dem Anbau von Nassreis. Dabei könnte er so viel Treibhausgas freigesetzt haben, dass er das Klima beeinflusste

TELESKOPE SEITE 54

Der größte Feldstecher der Astronomen

Zwei Riesenspiegel auf einer gemeinsamen Montierung, dazu ausgefeilte Analysegeräte – das Large Binocular Telescope eröffnet eine neue Ära in der beobachtenden Astronomie

SEITE 62

nature REVIEWS NEUROSCIENCE

MEDIZINETHIK

Wann gilt der Mensch als tot?

Nicht erst mit dem tragischen Tod der Amerikanerin Terri Schiavo flammte die Diskussion wieder auf, wie mit Patienten im irreversiblen Wachkoma umzugehen sei. Hirntot sind Menschen in einem solchen Zustand jedenfalls nicht

SEITE 82

INTERNET

Suchmaschinen

Den Nachfolgern von »Google« kann man nicht nur ein Wort hinwerfen, sondern auch ein Bild oder eine Melodie – und die Software findet, was der Nutzer wirklich sucht, weil sie seine Vorlieben sorgfältig aufgezeichnet hat

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

TITELTHEMA PHYSIK

SEITE 36

Das Rätsel der Masse

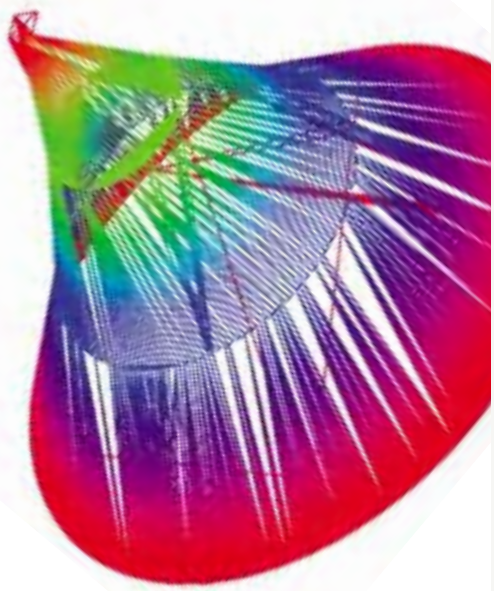
Die Jagd ist eröffnet auf ein Teilchen, das die Existenz eines neuartigen, allgegenwärtigen Felds beweisen soll. Das Vorhandensein dieses Higgs-Felds würde Grundfragen über den Aufbau des Universums beantworten

SEITE 90

EPIDEMIOLOGIE

Pocken in Portland – simuliert

Ein gigantisches Simulationsprogramm verfolgt jeden Einwohner einer fiktiven Stadt und seine Begegnungen mit seinesgleichen, um die Folgen – zum Beispiel – eines Bioterrorangriffs präzise einzuschätzen



SEITE 110

ESSAY

Wille und Wissen

Wir können nicht alles wissen – deshalb ist unser Wille frei

KOMMENTARE

26 Angemerkt
Klingende Kissen für die Kampfmoral

27 Springers Einwürfe
Weltuntergang durch Teilchenphysik?

WISSENSCHAFT IM …

52 Alltag: Schnee aus Kanonen

77 Rückblick: Künstlicher Mond · Das kindliche Gemüt der Frau u. a.

JUNGE WISSENSCHAFT

78 Zwei Wochen im Ausnahmezustand
Die Deutsche SchülerAkademie

REZENSIONEN

98 Der Zahlen gigantische Schatten
von R. Taschner
Vom Neandertaler zum modernen Menschen von W. Schürle, N. J. Conard und S. Kölbl (Hg.)
Über die Natur der Dinge
von M. Bunge und M. Mahner
Out of this World von S. Webb
The Science of The Hitchhiker's Guide to the Galaxy von M. Hanlon
Schwarzbuch Klimawandel
von H. Kromp-Kolb und H. Formayer
Sternenflug und Sonnenfeuer
von C. Kerner (Hg.)

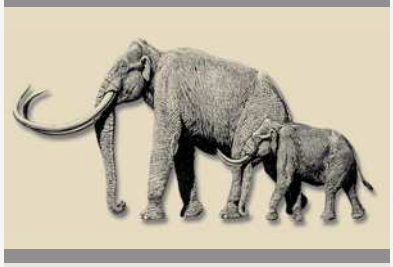
PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

106 Geometrie mit Compton

WEITERE RUBRIKEN

7 Editorial · 10 Leserbriefe/Impressum · 103 Preisrätsel · 114 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



CARL BUELL

Untergang der Mammuts

Starben diese Großsäuger am Ende der Eiszeit durch den Klimaumschwung? Oder rottete der Mensch sie aus?

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE
NACH ANMELDUNG MIT KUNDENNUMMER

LESERBRIEFE

Denkt er?

Wann begann der Mensch zu denken?, Dezember 2005

Bei dem Titel »Wann begann der Mensch zu denken?« ist Ihnen ein Fehler unterlaufen. Korrekt muss es ja wohl heißen: »Wann beginnt der Mensch (endlich) zu denken?«

Prof. Dr. Rainer Bunge, Rapperswil, Schweiz

Ausweg aus Unmündigkeit

Theologie ist die demütigere Wissenschaft, November 2005

Es gibt keine »Erkenntnisse der Aufklärung«, vielleicht die eine, dass Religionen in der Wissenschaft und der Staatsführung nichts zu suchen haben. Aufklärung ist eher »der Ausweg des Menschen aus seiner selbst verschuldeten Unmündigkeit«. Dazu gehört Bildung als Ideal, Humanität und forschende Haltung bei Widerspruch.

B. Spintzyk, Berlin

Folge der Ausbeutung

Das Ende des Elends November 2005

J. D. Sachs verneint die These, dass Armut die Folge von Ausbeutung ist, und behauptet, sie selbst wäre die Ursache. Das ist so nicht haltbar. Ein Beispiel: Es gibt keinen Zweifel, dass in den Andenstaaten vor dem Erscheinen der Spanier vielleicht kein Paradies geherrscht hat, dass es aber wohl eine funktionierende und bewundernswerte Landwirtschaft gab, die viele Produkte hervorgebracht hat, die heute noch unsere Speisekarte so attraktiv machen (Tomaten, Mais, Paprika, Kartoffeln und andere). Diese Landwirtschaft wurde von den Eroberern systematisch zerstört! Die Armut dieser Länder ist ganz eindeutig eine Folge der Ausbeutung. Ganz abgesehen von der direkten Ausrottung der Ureinwohner, auch in Nordamerika.

Ich wünsche, dass die positiven Zukunftserwartungen von J. D. Sachs in Erfüllung gehen. Aber die These, dass allgemeiner Reichtum automatisch Reichtum für alle bedeutet, funktioniert nicht! Individuelle Hilfe und Zuwendung sind nötig, wie in dem folgenden Artikel von P. Polak so schön deutlich wird.

Dr. Martin Errenst, Köln

Vor allem das Land ist in den meisten Entwicklungsländern extrem ungleich verteilt: Die fruchtbarsten Böden gehören Großgrundbesitzern, die darauf für den Export und nicht für die Ernährung der Bevölkerung produzieren. Kleinbauern und Landlose müssen derweil auf schlechteren Böden um ihr Überleben kämpfen. Da fragt es sich, ob Bewässerungssysteme für Kleinbauern nicht bloße Symptombekämpfung sind und ob Landreformen nicht hilfreicher wären.

Sandra Ujpétery, Zürich

Entropieabnahme möglich

Wirtschaft in einer begrenzten Welt, Dezember 2005

Das zweifelsohne sehr anschauliche Bild der Sanduhr ist für unsere Erde nur eingeschränkt gültig. Die Erde ist nämlich keineswegs ein geschlossenes System (und nur für solche Systeme gelten die Hauptsätze der Thermodynamik). Sie erhält, wie im Kasten richtig dargestellt, ständig Energie durch die Sonneneinstrahlung; ebenso wird auch Energie durch Strahlung in den umgebenden Raum abgegeben.

Dies wirkt sich offensichtlich auf den ersten Hauptsatz aus (eine Energiezunahme des Systems Erde ist möglich), schränkt aber auch die Anwendbarkeit des zweiten Hauptsatzes ein.

In einem offenen System ist nämlich eine Abnahme der Entropie durchaus möglich, wie jeder weiß, der schon einmal einen ungeordneten Haufen Puzzleteile zu einem ansehnlichen Bild zusammengesetzt hat.

Ebenso entstehen auf der Erde fortwährend hochgeordnete (entropiearme) Strukturen wie Pflanzen und Lebewesen aus ungeordneter (entropiereicher) Materie. Voraussetzung dafür ist, dass irgendwo außerhalb des offenen Systems eine mindestens ebenso große Entropiezunahme erfolgt, sodass für das gesamte, geschlossene System die Einhaltung der Hauptsätze gewährleistet ist.

Eine Forderung an Nachhaltigkeit könnte demnach lauten: Wir müssen dafür Sorge tragen, dass wir nur so schnell Entropie erzeugen, wie das System Erde sie unter Ausnutzung der Sonnenenergie wieder abbauen kann.

Dr. Hans Henning Wenk, Essen

Innovationsvorteile – ökologische Nachteile

Wir haben dreißig Jahre geschlafen, Interview Dezember 2005

Natürlich argumentiert ein Industriemanager, dass bei Behinderung grüner Gentechnik in Deutschland Forschung und Produktion ins willige Ausland gehen. So sind alle Umwelt- und Arbeitsschutzauflagen aus Industriekreisen kommentiert worden. Ich schließe nicht aus, dass Pflanzen, die derart verändert wurden, dass sie hohe Resistenzen gegen Hitze, Kälte, Trockenheit, Wetterschwankungen, Viren und andere Bedrohungen haben, sich dereinst als Segen herausstellen. Deshalb müssen Industrie und Forschung ein großes Interesse daran haben,

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▶ Die Sanduhr links zeigt die uns ständig Energie liefernde Sonne. Rechts werden Ressourcen mit niedriger Entropie zu Abfall mit hoher Unordnung.

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com

Sorgfalt walten zu lassen. Es gibt sicher nur wenige Innovationen, deren Vorteile nicht auch mit ökologischen Nachteilen erkauft wurden. In der Situation der Welt ist meines Erachtens Bedenkenlosigkeit nunmehr mit Verantwortungslosigkeit gleichzusetzen. Wir können uns das nicht mehr leisten.

In schöner Klarheit ist das bei Jared Diamond in »Kollaps« zu lesen.

Manfred Peters, Hamburg

Suche nach dem Urgrund des Seins

Intelligent Design – wo bleibt die Wissenschaft? Leserbriefe, Dezember 2005

Die in der Öffentlichkeit und insbesondere in Ihrer Zeitschrift wieder neu entbrannte Diskussion um das so genannte Intelligent Design ist die alte Frage nach dem Beweis der Existenz Gottes beziehungsweise dem Beweis, dass es keinen Gott gibt. Beide Fragen sind meines Erachtens nicht beweisbar.

Die Argumente der Atheisten und der Gottgläubigen sind vom wissenschaftlichen Standpunkt aus sehr ungleich. Überall dort, wo ein kausaler Zusammenhang natürlicher Vorgänge wissenschaftlich bewiesen wurde, muss zwangsläufig göttliches Wirken ausgeschlossen werden, sodass sich der Gottesglaube wissenschaftlich in der Defensive befindet.

Als mögliche Wirkungskreise Gottes anstatt a) neben den Naturgesetzen – Wunder – oder b) innerhalb der Naturgesetze – Zufall – ist im Intelligent Design c) der Urgrund des Seins aufgegriffen worden. Diese Idee ist nicht neu. Religiöse Ideen vom unbewegten Beweger gibt es seit dem frühen Altertum. Ein Gott, der nicht aktiv, nicht willkürlich auf den Weltenlauf steuernd Einfluss nimmt, ist mit wissenschaftlichen Argumenten unangreifbar.

Aus dem Vordringen der Wissenschaft in immer neue Bereiche kann nicht geschlussfolgert werden, dass der Urgrund des Seins – nach Goethe das, was die Welt im Innersten zusammenhält – tatsächlich gefunden wird. Im Gegenteil, aus erkenntnistheoretischer Sicht ist es nicht möglich, dieses zu finden, da dann der Erkenntnis ein Endpunkt gesetzt wäre. Wir werden also weiter mit unserem Glauben an Gott oder daran, dass es keinen Gott gibt, leben müssen.

Peer Hosenthien, Magdeburg

Problem sind fossile Energieträger

Gute Luft als Ware Dezember 2005

Wenn eine globale Erwärmung, soweit sie auf der Zunahme des Kohlendioxidgehalts der Luft beruht, verhindert oder zumindest vermindert werden soll, so ist Voraussetzung, dass die Gesamtförderung von Kohle, Erdgas und Erdöl reduziert wird. Solange jedoch die weltweite Gewinnung dieser fossilen Energieträger zunimmt, so lange wird auch der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre und die dadurch bedingte Erderwärmung zunehmen.

Ein Handel mit Emissionsrechten für Treibhausgase ist keine Lösung, und von einem Erfolg der modernen Techniken (Solar- und Windenergie, Verwendung nachwachsender Biomasse) kann man erst dann sprechen, wenn durch ihren Einsatz die Gesamtförderung fossiler Energieträger zurückgeht.

Dr. Erwin Neupert, Nürnberg

Einsteins Erbe verschenkt?

Editorial, Dezember 2005

Einsteins Erbe wird nicht verschenkt, sondern vergeudet. Nach meiner Diplomarbeit in theoretischer Physik, in der eine neue Skalar-Tensor-Gravitationstheorie vorgestellt wurde, hatte ich bis zur Promotion in Allgemeiner Relativitätstheorie eine Assistentenstelle. Danach existierten keine Stellen im Forschungsbereich und ich erhielt von keiner Seite auch nur die geringste Unterstützung.

Heute gibt es die Junior-Professur für Langzeitstudierende, den Bachelor und Master als Schmalspurabschluss, quasi als minderwertigen Ersatz für Vordiplom- und Diplomabschlüsse. Diese sind streng nach den momentanen Forderungen der Industrie ausgerichtet und dementsprechend einseitig verwendbar. Niemand braucht Allgemeine Relativitätstheorie wirklich, Deutschland benötigt Juristen, Verwaltungsexperten und Manager.

Wecken Sie bitte nicht bei Ihren Lesern, Kindern oder Enkeln den Wunsch nach einem Studium der Physik, und schon gar nicht dem der theoretischen Physik und am allerwenigsten dem der Allgemeinen Relativitätstheorie, wenn Ihnen etwas an diesen Menschen liegt. Das Erwachen in der wirklichen Welt ist grausam.

Gerd Schmidt, Frankfurt

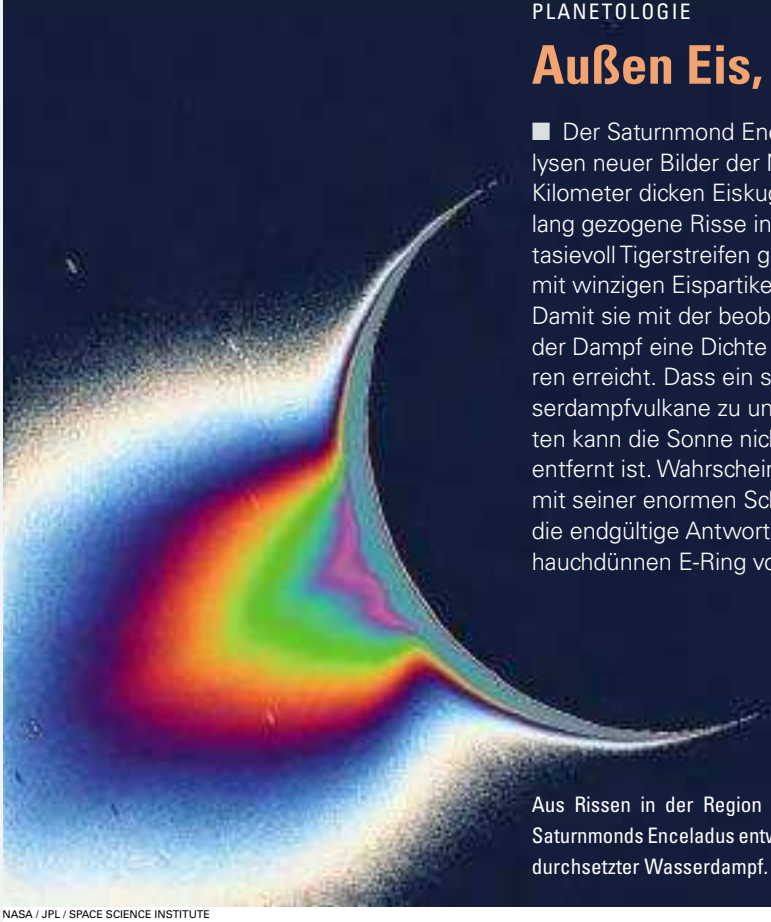
Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 8114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Doris Gerstner, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Andreas Nestke, Claus-Peter Sesin.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, D-70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 27 vom 01.01.2006.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2006 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.
ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



NASA / JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

Aus Rissen in der Region um den Südpol des Saturnmonds Enceladus entweicht mit Eisteilchen durchsetzter Wasserdampf.

PLANETOLOGIE

Außen Eis, innen heiß

Der Saturnmond Enceladus hat offenbar einen heißen Kern. Das ergaben Analysen neuer Bilder der Nasa-Raumsonde Cassini, die im Juli an der nur etwa 500 Kilometer dicken Eiskugel vorbeigeflogen war. Die hoch aufgelösten Fotos zeigen lang gezogene Risse in der Region um den Südpol, von den Wissenschaftlern fantasievoll Tigerstreifen genannt. Aus ihnen entweichen Dampfstrahlen im Gemisch mit winzigen Eispartikeln und bilden eine bis zu 500 Kilometer hohe Gasglocke. Damit sie mit der beobachteten Gewalt aus der Oberfläche hervorschießen, muss der Dampf eine Dichte haben, die er nur unter Druck bei relativ hohen Temperaturen erreicht. Dass ein so kleiner Himmelskörper im Innern heiß genug ist, um Wasserdampfvulkane zu unterhalten, verwundert die Forscher. Anders als bei Kometen kann die Sonne nicht die nötige Wärme liefern, weil Enceladus zu weit von ihr entfernt ist. Wahrscheinlich heizen Gezeitenkräfte den Mond auf, die der Saturn mit seiner enormen Schwerkraft auf ihn ausübt. Die Dampfstrahlen geben auch die endgültige Antwort auf eine alte Frage, woher die Materie kommt, die den hauchdünnen E-Ring von Saturn speist.

Pressemeldung des Cassini Imaging Teams, 6.12.2005

MESSTECHNIK

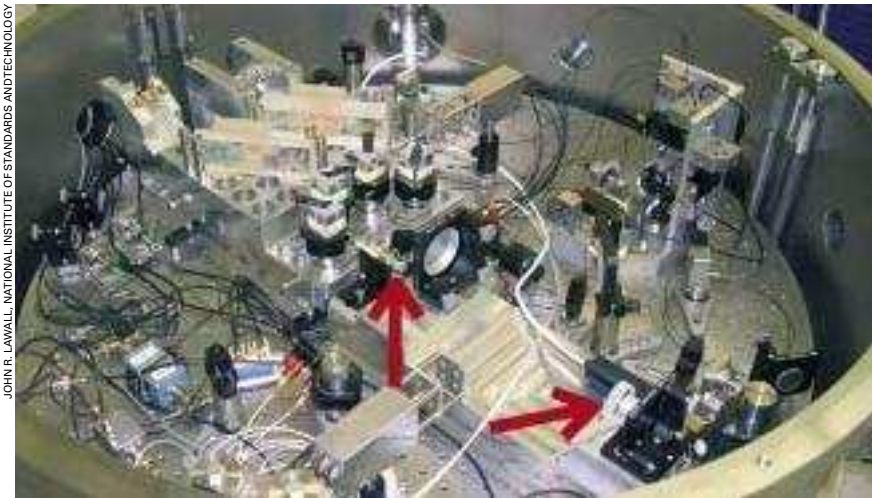
Auf den milliardstel Millimeter genau

Für Präzisionsmessungen von Entfernungen bedienen sich Physiker oft des Lasers und ermitteln die Zahl der Wellen zwischen zwei Punkten. Doch die Genauigkeit ist dabei durch die Wellenlänge des verwendeten Lichts auf einige hundert Nanometer begrenzt. John R. Lawall vom amerikanischen National Institute of Standards and Technology (Nist) in Gaithersburg (Maryland) konnte die Präzision jetzt um das Zehntausendfache verbessern.

Seine Methode ähnelt derjenigen zum Messen der Länge von Orgelpfeifen. Dabei nutzt man das Phänomen der Resonanz. Die Pfeife wird Schallwellen kontinuierlich steigender oder fallender Tonhöhe ausgesetzt, bis sie mit maximaler Lautstärke erklingt, weil die Anregungsfrequenz mit ihrer Eigenschwingung übereinstimmt. Aus dieser Frequenz lässt sich dann die Länge errechnen.

Lawall ersetzt die Schallwellen durch den Laser und die Orgelpfeifen durch zwei parallele Spiegel in einer Vakuumkammer. Das zwischen ihnen hin- und herreflektierte Licht wird in seiner Frequenz so lange moduliert, bis eine stehende Welle entsteht. Aus deren Frequenz ergibt sich der Spiegelabstand. Durch die Bestimmung von zwei stehenden Wellen statt nur einer konnte der Nist-Forscher selbst Entfernungen von 25 Millimetern noch auf zehn Pikometer genau messen.

Journal of the Optical Society of America A, Dezember 2005



JOHN R. LAWALL, NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY

Mit dieser Apparatur lassen sich Entfernungen zwischen zwei Spiegeln (Pfeile) auf zehn Pikometer genau bestimmen.

CHEMIE

Nanopyramiden aus DNA

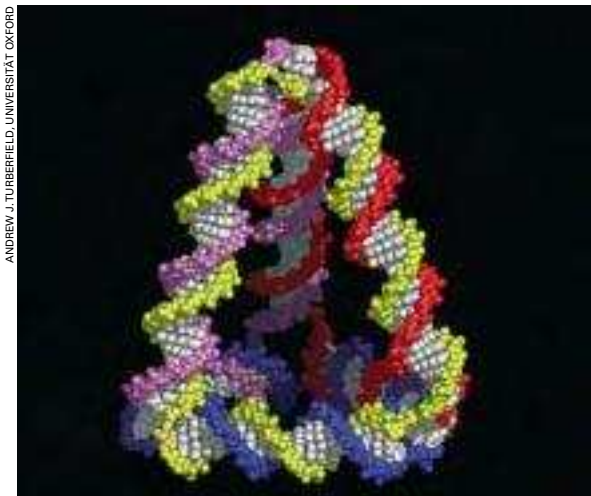
Ein Kind ist er schon lange nicht mehr, doch Lego-Spiele liebt Andrew J. Turberfield noch genauso wie früher. Nur ist das Spielzeug heute kleiner. Aus DNA, dem Baumaterial unserer Erbsubstanz, hat der Physikprofessor von der Universität Oxford gemeinsam mit Kollegen jetzt winzige Pyramiden konstruiert, die in jede Richtung kaum mehr als zehn Nanometer messen.

Als Ausgangsmaterial dienten vier Einzelstränge mit fünf verschiedenen Abschnitten, die jeweils so zusammengesetzt sind, dass sie sich mit einem bestimmten Abschnitt auf einem anderen Strang zu einer Doppelhelix paaren. Dadurch formen sich die DNA-Tetraeder binnen weniger Sekunden durch Selbstorganisation praktisch von allein – und das mit Ausbeuten von 95 Prozent.

Das Herstellungsverfahren ist also einfach und effizient genug, um auch im technischen Maßstab einsetzbar zu sein. Wegen ihrer Pyramidenform sind die neuen Nanoklötzchen zudem sehr stabil und belastbar, sodass sie ideale Baustoffe zur Verknüpfung von elektronischen und biologischen Teilen bilden dürften. Außerdem können Wissenschaftler daran untersuchen, wie weit sich DNA biegen lässt, bevor sie bricht.

Science, 9.12.2005, S. 1661

ANDREW J. TURBERFIELD, UNIVERSITÄT OXFORD



Kein Spielzeug, sondern Nanobaustoff für die Zukunft: Tetraeder aus DNA-Strängen, die sich durch Selbstorganisation bilden

ARCHÄOLOGIE

Keltengold in Süddeutschland

Die Heuneburg im schwäbischen Landkreis Sigmaringen gilt als die am besten erforschte Keltensiedlung Mitteleuropas. Erst unlängst machte sie nach der Ausgrabung eines Steintors aus dem fünften vorchristlichen Jahrhundert Schlagzeilen als möglicherweise älteste Stadt Deutschlands. Nun ist Wissenschaftlern um Siegfried Kurz vom Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Tübingen ein weiterer bemerkenswerter Fund gelungen. Bei einer Feldbegehung stießen die Forscher etwa zwei Kilometer entfernt von der Siedlung auf eine vergoldete Bronzefibel, die auf einem durch Ackerbau fast eingeebneten Grabhügel lag.

Gezielte Grabungen förderten weitere Schmuckstücke zu Tage: eine zweite Gewandspange, bronzene Ringe, mehrere kleine Gegenstände aus Bronze, Teile einer mehrteiligen Halskette und zwei Anhänger aus Gold. Letztere sind offenbar etruskischer Herkunft, was auf weit reichende Handelsbeziehungen schließen lässt. Die bestattete Person war vermutlich ein zwei- bis vierjähriges Mädchen. Das ergab die Analyse der Zähne, die als einzige menschliche Überreste erhalten sind. Den kostbaren Grabbeigaben nach zu urteilen, dürfte das Kind aus einer sozial aufgestiegenen Bauernfamilie gestammt haben.

Pressemitteilung der Universität Tübingen vom 24.11.2005

REGIERUNGSPRÄSIDIUM TÜBINGEN, REFERAT 25, DENKMALPFLEGE

Im neu entdeckten Grab eines keltischen Mädchens bei Sigmaringen fand sich dieser goldene Anhänger mit typisch etruskischer Verzierung.

BIOPHYSIK

Klimmzüge im Karussell

Die zierliche *Vorticella* beschämt jeden Muskelmann. Der Einzeller besteht aus einer glockenförmigen »Blüte«, die mit einem langen Stiel an einer Unterlage haftet. Dieser schnurrt bei Gefahr zu einer Spirale zusammen. Wissenschaftler von drei US-Forschungsinstituten konnten jetzt zeigen, welche gewaltigen Kräfte *Vorticella* dabei entwickelt.

Mit einem Spezialmikroskop beobachteten sie das Glockentierchen, während es auf dem Rand einer Scheibe rotierte. Dabei trotzte es selbst stärksten Zentrifugalkräften und zog noch bis zu einer Rotationsgeschwindigkeit, bei der das 10000fache der irdischen Schwerebeschleunigung auf es einwirkte, den Stiel zusammen. Ein Mensch müsste mit einer Last von mehr als 500 Tonnen an den Beinen Klimmzüge machen, um eine entsprechende Leistung zu erbringen.

Den erstaunlichen Kraftakt vollführen Faserbündel im Inneren des Stiels, die großenteils aus dem Protein Zentrin bestehen. Es ändert unter dem Einfluss von Kalziumionen seine Form. Die Forscher hoffen, dass sich auf seiner Basis einmal ähnlich superstarke Miniaturmaschinen konstruieren lassen.

Jahreskonferenz der American Society for Cell Biology in San Francisco, 10.–14.12.2005

NICK BARTOSIK

Ein »Batman« der Art *Rousettus aegypticus* investiert als echter Macho mehr in die Hoden als ins Hirn.

VERHALTEN

Große Hoden, kleines Hirn

Die Männchen mancher Fledermausarten sind höchst üppig ausgestattet: Ihre Geschlechtsorgane machen bis zu 8,5 Prozent ihrer Körpermasse aus – gegenüber nur 0,02 bis 0,75 Prozent bei Primaten. Was rechtfertigt diesen Luxus, wenn man bedenkt, dass Hoden eine hohe Stoffwechselrate haben, also viel Energie verbrauchen? Scott Picknick von der Universität Syracuse (US-Bundesstaat New York) und Kollegen haben nun die Antwort gefunden.

Sie untersuchten 334 Fledermaus- und Flughundspezies auf Hoden- und Hirngröße. Dabei stellten sie fest, dass die Männchen genau dann ein besonders stattliches Gemächt – und ein relativ kleines Gehirn – haben, wenn es keine festen Paarbindungen gibt. Offenbar verhelfen imposante Genitalien zu mehr Chancen bei der ständigen Konkurrenz um die Gunst der Weibchen. Bei monogamen Fledermausarten dagegen können es sich die Männchen leisten, mehr ins Hirn als in die Hoden zu investieren. Treue fördert die Intelligenz – vielleicht erklärt das ja auch die Monogamie bei uns Menschen.

Proceedings of the Royal Society B, Online-Vorabveröffentlichung, 10.10.2005

KLIMA

Trauriger Treibhausrekord

Noch nie in den letzten 650000 Jahren enthielt die irdische Lufthülle so viele Treibhausgase wie heute. Das zeigt die Analyse eines mehr als drei Kilometer langen Eiskerns, der im Rahmen des europäischen Epica-Projekts in der Antarktis erbohrt wurde. Die darin eingeschlossenen Luftblasen geben Aufschluss über die einstige Zusammensetzung der Atmosphäre. Demnach überstieg der Anteil an Kohlendioxid vor 390000 bis 650000 Jahren zu keinem Zeitpunkt 290 millionstel Volumenanteile (*parts per million*, ppm), während er gegenwärtig bei 375 ppm liegt. Der Gehalt an Methan ist heute mit 1,7 ppm sogar fast dreimal so hoch wie der Maximalwert in dem untersuchten Zeitraum. Beide Gase heizen die Erde auf.

Mit der neuen Untersuchung haben Wissenschaftler um Thomas Stocker von der Universität Bern das Fenster in die Vergangenheit gegenüber früheren Studien um 210000 Jahre erweitert. Damit lassen sich nun insgesamt acht Eiszeiten zurückverfolgen. Dabei zeigt sich auch, dass die enge Kopplung zwischen dem Gehalt der Atmosphäre an Kohlendioxid und den Temperaturen der oberen Schichten des Südpolarmeers seit 650000 Jahren unverändert besteht. Als Maß für die Wassertemperatur dient der Gehalt an dem schweren Sauerstoff-Isotop der Masse 18 in den Gasbläschen. Erhöht sich sein Anteil mit der Erwärmung des Meers, steigt auch die Konzentration an Kohlendioxid.

Science, 25.11.2005, S. 1313 und 1317

W. BERNER, UNIVERSITÄT BERN

Gasblasen im Eis der Antarktis geben Aufschluss über das Klima der Vergangenheit.

PALÄONTOLOGIE

Urzeitlicher Riesenskorpion

Auch ein harmloser Strandspaziergang kann zum Gewinn für die Wissenschaft werden – vorausgesetzt der Spaziergänger hat das geübte Auge eines Martin Whyte. Wo andere nur einen überhängenden Fels an der Meeresküste sahen, entdeckte der Geologe von der Universität Sheffield (Großbritannien) die etwa 330 Millionen Jahre alten Abdrücke eines ausgestorbenen Wasserskorpions der Gattung *Hibbertopterus*.

Seine Laufspur ist sechs Meter lang und fast einen Meter breit. Zwei äußere, wellenförmig verlaufende Gürtel stammen von den drei Beinpaaren. Dazwischen liegt eine Schleifspur, die der Schwanz des Gliederfüßers in den Untergrund gezeichnet hat. Anhand dieser Maße schätzt Whyte die Länge des Skorpions auf 1,6 Meter – rund das Hundertfache der Körperdimensionen heutiger Vertreter dieser Tiergruppe.

MARTIN WHYTE, UNIVERSITÄT SHEFFIELD

Vor etwa 330 Millionen Jahren zog ein mannsgroßer Wasserskorpion hier seine Spur.

Den Analysen des Forschers zufolge können die Spuren nur an Land entstanden sein. Sie verraten, dass dem riesigen Meerestier das Krabbeln außerhalb des Wassers schwer fiel: Er schleppte sich nur recht schwerfällig über den Boden. Er war auch nicht der erste bekannte Landgänger. Diesen Schritt hatten Wirbeltiere bereits einige Jahrmillionen vor ihm getan. Doch gibt es keinen Wirbellosen, von dem je eine größere fossile Spur gefunden wurde.

Nature, 1.12.2005, S. 576

Mitarbeit: Achim G. Schneider und Stephanie Hügler

Fußspuren von Eiszeitmenschen

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Vor rund 20000 Jahren tummelte sich ein Häuflein Frühmenschen am Ufer eines inzwischen ausgetrockneten Sees im heutigen Mungo-Nationalpark im südostaustralischen Bundesstaat Neusüdwales. Erwachsene und Kinder hinterließen Fußspuren im feuchten Lehmboden, der später festbackte und unter Sanddünen begraben wurde. Insgesamt 457 Abdrücke wurden seit 2003 dort ausgegraben – die größte solche Ansammlung weltweit und die älteste in Australien. Bemerkenswert ist die ungewöhnlich deutliche Fußspur eines mindestens 1,90 Meter großen Manns (siehe eingeklinktes Foto). Nach der Schrittlänge zu schließen, lief er mit einer Geschwindigkeit von dreißig Kilometern pro Stunde – ein fast olympiareifes Tempo. Vielleicht jagte er zusammen mit Helfern Wasservögel.

Erst vor knapp drei Jahren wurden in Italien die bislang ältesten Fußspuren eines Mitglieds der Gattung *Homo* entdeckt. Sie entstanden vor rund 350000 Jahren und stammten im Unterschied zu den australischen daher nicht von einem anatomisch modernen Menschen. Dessen älteste bekannte Fußabdrücke fanden sich 1995 in Südafrika.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

QUANTENPHYSIK

Von Qubytes und untoten Katzen

Physiker in den USA und Österreich konnten sechs beziehungsweise acht Atome in einen gemeinsamen Überlagerungszustand bringen – ein Rekord, der den Weg zum Quantencomputer ein kleines Stück weit ebnet.

Von Oliver Morsch

Erwin Schrödinger erdachte 1935 ein berühmt gewordenes Gedankenexperiment: Eine Katze sitzt in einem geschlossenen Kasten, in dem ein Hämmerchen, über den Zerfall einer radioaktiven Substanz gesteuert, irgendwann ein Fläschchen mit Giftgas zerschlägt. Damit wollte der österreichische Physiker eine paradox erscheinende Folgerung der Quantenmechanik illustrieren, auf die kurz zuvor Albert Einstein aufmerksam gemacht hatte. Solange man nicht in den Kasten hineinsieht, weiß man nicht, ob ein Atom der radioaktiven Substanz zerfallen ist oder nicht. Dieses liegt demnach – so die gängige quantenmechanische Deutung – in einer Überlagerung der beiden Zustände »intakt« und »zerfallen« vor und nimmt erst in dem Moment, in dem wir nachschauen, wahrscheinlichkeitsgesteuert einen davon an.

Bis dahin bleibt somit auch unklar, ob das durch den Zerfall gesteuerte Hämmerchen das Giftgas freigesetzt hat und das Tier tot oder lebendig ist. Die möglichen Zustände »zerfallen« oder »nicht zerfallen« eines radioaktiven Atoms sind also mit den Zuständen »tot« oder »lebendig« der Katze direkt verbunden – oder »verschränkt«, wie Schrödinger es nannte. Das wiederum heißt nichts anderes, als dass nach quantenmechanischer Logik auch das Tier die ganze Zeit gleichzeitig lebt und gestorben ist.

Das steht natürlich in krassem Widerspruch zu unserer täglichen Erfahrung, wonach sich alle Dinge in einem bestimmten, wohldefinierten Zustand befinden: Eine Münze zeigt entweder Kopf oder Zahl, und Katzen sind entweder tot oder lebendig. Doch in der Welt der kleinsten Teilchen stimmt das nicht mehr. So muss sich ein Atom, das einen »Spin« besitzt und sich damit in einem Magnetfeld wie eine kleine Kompassnadel nach oben oder unten ausrichten kann, nicht unbedingt zwischen diesen zwei Möglichkeiten entscheiden: Es kann ebenso gut in einer »Zwitterform« vorliegen, die beide Eigenschaften in sich vereint.

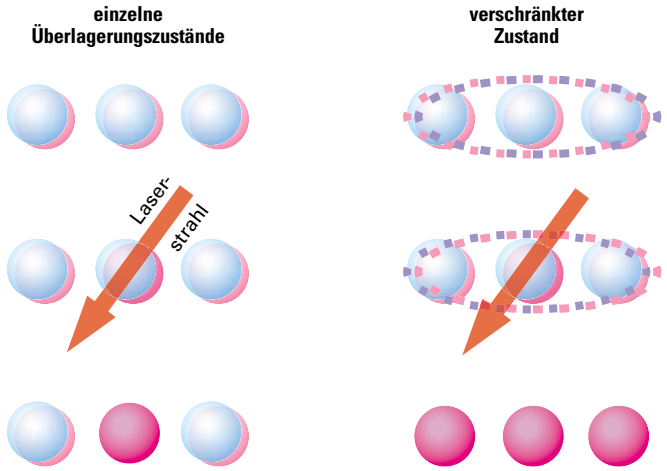
Wenn man ein Atom kitzelt und das andere lacht

Analog zu Schrödingers Gedankenexperiment erlaubt die Quantenmechanik auch die Überlagerung der Zustände mehrerer Teilchen, die damit automatisch zugleich verschränkt sind. Dann gilt zum Beispiel für die Spins zweier Atome, dass sie gleichzeitig beide nach oben und beide nach unten weisen. Dagegen kann nicht einer nach oben und der andere nach unten zeigen – so wie bei Schrödinger die Kombination »Atom zerfallen« und »Katze lebt« nicht möglich ist. Misst man nun an Atom 1 einen Spin nach oben, so muss der Spin von Atom 2 ebenfalls nach oben zeigen, da sich das Gesamtsystem aus beiden Teilchen bei der Messung für denjenigen Zustand entschieden hat, in dem die Spins einheitlich aufwärts weisen.

Einstein behagte diese Folgerung der Quantenmechanik nicht, da sie eine »spukhafte Fernwirkung« zu beinhalten schien, die der US-Physiker Jeff Kimble einmal so beschrieben hat: »Verschränkung ist, wenn man ein Atom kitzelt und das andere lacht.« Tatsächlich mussten sich aber auch skeptische Physiker nach entscheidenden Versuchen an Photonen in den 1980er Jahren damit abfinden, dass Teilchen in verschränkten Zuständen einander »spüren«, selbst wenn sie weit voneinander entfernt sind.

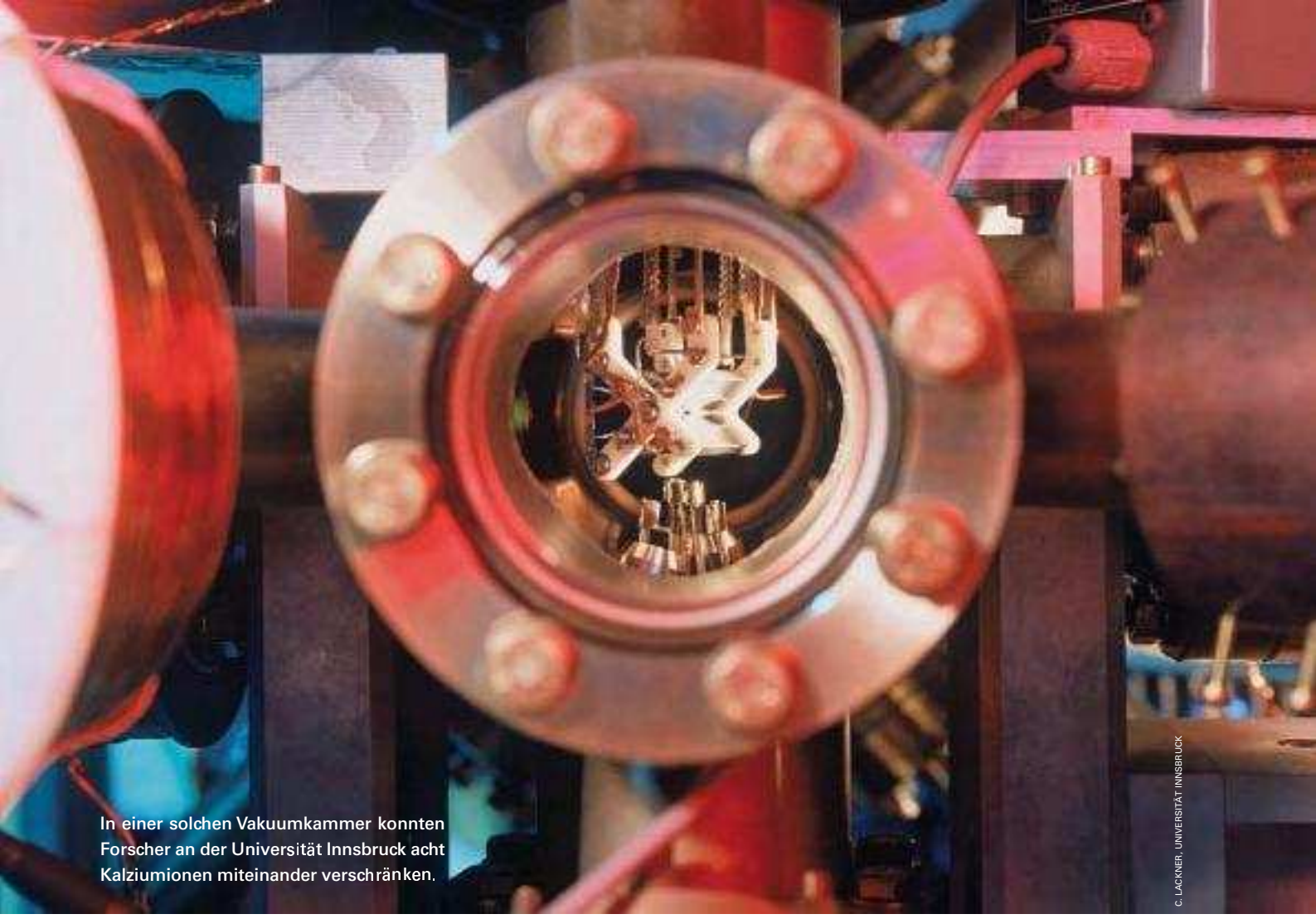
Warum kann nun eine reale Katze nicht gleichzeitig tot und lebendig sein? Dazu müssten alle ihre Atome in einem verschränkten Überlagerungszustand mit dem radioaktiven Element vorliegen. Doch der wäre extrem empfindlich und würde sofort zerfallen. Je mehr Teilchen nämlich miteinander verschränkt sind, desto leichter können Störungen von außen zur »Dekohärenz« führen, bei der von den überlagerten Zuständen nur noch einer übrig bleibt.

In dieser Situation betreiben es Physiker schon seit Längerem als Sport, die Lücke zwischen nur zwei Teilchen und einer veritablen Katze zu schließen. Zuletzt war es gelungen, fünf Lichtquanten zu verschränken (Spektrum der Wissenschaft 11/2004, S. 14). Doch nun haben Dietrich Leibfried und seine Kol-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: OLIVER MORSCH

Befinden sich mehrere Atome einzeln in einer Überlagerung der quantenmechanischen Zustände »blau« und »rot«, führt eine Messung an einem von ihnen dazu, dass dieses Teilchen rot oder blau wird (links). Die anderen bleiben davon unberührt. Wenn die Atome aber zusätzlich miteinander verschränkt sind (rechts), liegen sie in einem kollektiven Überlagerungszustand von »alle blau« und »alle rot« vor. Die Messung des Zustands »rot« an einem von ihnen lässt dann auch alle anderen »erröten«.



In einer solchen Vakuumkammer konnten Forscher an der Universität Innsbruck acht Kalziumionen miteinander verschränken.

C. LACKNER, UNIVERSITÄT INNSBRUCK

legen vom National Institute for Standards and Technology (Nist) in Boulder (USA) diesen Rekord überboten, indem sie eine aus sechs Atomen bestehende Schrödinger-Katze herstellten *(Nature, 1. 12. 2005, S. 639)*. Ein Team um Hartmut Häffner von der Universität Innsbruck meldete gar die Verschränkung von bis zu acht Atomen *(Nature, 1. 12. 2005, S. 643)*.

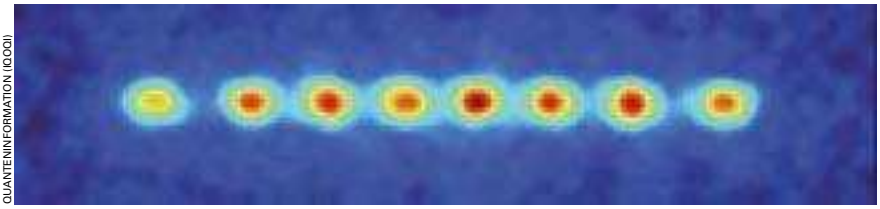
Um die Dekohärenz zu verhindern, schirmten die Forscher im Labor von David Wineland in Boulder ihre Atome so gut wie möglich von der Außenwelt ab. Durch elektrostatische Kräfte hielten sie ionisierte Berylliumatome in einer Vakuumapparatur fest und kühlten sie mit Laserstrahlen auf extrem tiefe Temperaturen, sodass die thermische Bewegung möglichst gering war. Bis zu sechs solcher Atome reihte das US-Team auf diese Weise im Abstand von wenigen tausendstel Millimetern wie auf einer Perlenkette aneinander. Zunächst versetzte es sie einzeln in Überlagerungen zweier Quantenzustände – nennen wir sie willkürlich »rot« und »blau«. Danach regte es die Teilchen mit weiteren Laserstrahlen kurzzeitig zu einer kollektiven Schwingung an. Wie in einer Telefon-Konferenzschaltung standen alle Atome dadurch für einen Moment miteinander in Kontakt und wurden auf diese Weise verschränkt: Sie befanden sich nun in einer Überlagerung der quantenmechanischen Zustände »alle Atome blau« und »alle Atome rot«. Eine Messung, bei der sich eines von ihnen als rot erwies, hatte somit zur Folge, dass augenblicklich alle anderen ebenfalls rot wurden.

Stille Post statt Konferenzschaltung

In einem ähnlichen Experiment mit Kalziumionen stellten Häffner und Kollegen im Labor von Rainer Blatt in Innsbruck einen so genannten »W-Zustand« mit bis zu acht Atomen her. Das ist eine Überlagerung aller möglichen Gesamtzustände, in denen jeweils ein einziges Atom eine andere Spinrichtung aufweist als alle anderen. Im Gegensatz zum US-Experiment diente in Innsbruck keine kollektive Schwingung zum Verschränken. Vielmehr wurde eine Vibration zweier Atome gleichsam durch die Kette durchgereicht: Benutzten die Amerikaner eine Konferenzschaltung, so entsprach die Innsbrucker Technik eher dem Prinzip der Stillen Post.

Um nachzuweisen, dass bei dieser Prozedur tatsächlich der gewünschte Verschränkungszustand herauskam, maßen die Physiker in Hunderttausenden von Wiederholungen des Experiments mit gezielten Laserpulsen die Beziehungen zwischen den einzelnen Teilchen und verglichen sie mit theoretischen Berechnungen.

Der W-Zustand von Häffner und Kollegen hat den Vorteil, dass er gegenüber Störungen weniger empfindlich ist als eine Schrödinger-Katze. So kommt es selbst dann nicht zur Dekohärenz, wenn eines der Atome verloren geht. Diese besondere Stabilität ist für eine anvisierte Anwendung des reihenweisen Verschränkens höchst erwünscht: den Quantencomputer. Vorerst nur eine kühne Vision, soll dieses Gerät eines Tages komplizierte Probleme wesentlich schneller lösen als heutige Rechner. Statt mit Bits, die den Wert 0 oder 1 haben, arbeitet es mit »Qubits«, die alle möglichen Überlagerungen dieser beiden Werte darstellen ▷



INSTITUT FÜR QUANTENOPTIK UND QUANTENINFORMATION (IQOQI)

Vor der Verschränkung wurden die acht Kalziumionen, wie diese Aufnahme zeigt, fein säuberlich in Reih und Glied angeordnet.

können. Die Innsbrucker Forscher haben mit ihrem jüngsten Experiment nun zum ersten Mal ein aus acht Qubits bestehendes Qubyte geschaffen.

Doch nicht nur als Wegbereiter für den Quantencomputer sind die neuen Verschränkungsrekorde von Nutzen. Auch die Theoretiker profitieren davon. So können sie mit dem W-Zustand der Innsbrucker Forscher ihre Berechnungen zur Verschränkung vieler Atome testen, die deutlich komplizierter sind als bei nur zwei Teilchen. Sogar der extremen Empfindlichkeit der sechsbeinigen Schrödinger-Katze kann man etwas Positives abgewinnen: Zum einen lässt sich so feststellen, wie gut die Physiker ihre Atome unter Kontrolle haben – zerstört doch der geringste Fehler bei der Durchführung des Experiments die Verschränkung. Zum anderen kann man Störungen von außen – etwa durch winzige Magnetfelder – genauestens nachweisen. Bis zur Verschränkung größerer Gebilde aus Hunderten oder Tausenden von Atomen ist es allerdings immer noch ein weiter Weg.

Oliver Morsch ist promovierter Physiker und forscht an der Universität Pisa über Quantencomputer.

HIRNFORSCHUNG

Trügerische Traumfigur

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Auch ohne uns dessen bewusst zu sein, verfügen wir über ein mentales Bild vom eigenen Körper. Neurowissenschaftler konnten jetzt zeigen, welche Hirnstrukturen an seiner Konstruktion beteiligt sind – indem sie Versuchspersonen eine Wespentaille vorgaukelten.

Von Achim G. Schneider

Eine gute Figur zu haben ist für viele ein wichtiges Ziel. Ganze Industriezweige leben von dem Versprechen, dass ihre Produkte überflüssige Pfunde dahinschmelzen lassen oder erschlafftes Gewebe wieder straffen. Gesundheitsbewusste halten sich durch sportliche Betätigung in Form. Doch nun bringen Neurowissenschaftler aus England und Japan die frohe Botschaft, dass jeder zu seiner Traumfigur kommen kann, ohne Geldbeutel oder Muskulatur zu strapazieren. Kleiner Schönheitsfehler: Die plötzliche Schlankheit existiert nur in der Einbildung – als Ergebnis einer gestörten Selbstwahrnehmung.

Unbewusstes Körperbild

Auch ohne in den Spiegel zu schauen, haben wir eine Vorstellung von unseren Körpermaßen. Sie begleitet uns auf Schritt und Tritt und ist sogar unerlässlich für die Bewältigung vieler Alltagsaufgaben. Wenn wir uns zum Beispiel durch eine halb offene Tür zwängen, nehmen wir vorher unbewusst Maß, ob wir hindurchpassen. Selten stoßen wir dann an den Rahmen – ein sicheres Zeichen dafür, dass wir meist richtig abschätzen, wie breit, groß oder dick wir sind.

Doch wie machen wir uns dieses unbewusste Bild vom eigenen Körper? Der Tastsinn allein kann es nicht sein. Natürlich spüren wir, wenn wir irgendwo anstoßen. Bestimmte Nervenzellen in der Haut, so genannte Tastrezeptoren, nehmen jeden Berührungsreiz wahr, wandeln ihn in ein elektrisches Signal um und leiten ihn an spezialisierte Strukturen in der Großhirnrinde weiter. Hier sind die verschiedenen Körperteile wie auf einer Landkarte abgebildet. Aus dem Ankunftsort des eingehenden Signals kann unser Gehirn rekonstruieren, an welcher Stelle wir berührt worden sind.

Doch erlauben diese Informationen noch keine Rückschlüsse darauf, wo die Grenzen unseres Körpers verlaufen. Berührung ist ja keineswegs nötig, damit wir uns durch einen Türspalt schlängeln können. Schließlich holen wir uns in der Regel nicht erst eine Beule, bevor wir glücklich ins Nachbarzimmer kommen.

Wie Neurowissenschaftler heute wissen, entsteht unser Körperbild durch die Integration vieler verschiedener Signale, die im Gehirn zusammenlaufen. Tastsinn und visuelle Informationen spielen dabei eine wichtige Rolle. Ebenso bedeutend sind aber die Signale so genannter Propriorezeptoren, die ständig unsere Lage im Raum bestimmen. Dazu gehören Sinneszellen des Gleichgewichtsorgans im Innenohr, aber auch Sensoren, die in Muskeln, Gelenken und Sehnen Bewegungen und Positionen unserer verschiedenen Körperteile messen.

Normalerweise ergänzen sich die verschiedenen Sinneseindrücke zu einem in sich stimmigen, korrekten Selbstbild. Doch wenn man einige davon ausblendet und andere manipuliert, lässt sich das Gehirn so weit in die Irre führen, dass wir seltsame Verformungen unseres Körpers spüren. Das demonstrierte schon in den 1980er Jahren James Lackner von der Brandeis-Universität in Waltham (Massachusetts) in einem eindrucksvollen Experiment. Der Neurowissenschaftler forderte Versuchspersonen zunächst auf, sich mit verbundenen Augen an die Nasenspitze zu fassen. In dieser Position brachte er den Bizepsmuskel durch leichte Stromstöße zum Vibrieren. Nach wenigen Sekunden stellte sich bei den Probanden die Emp-

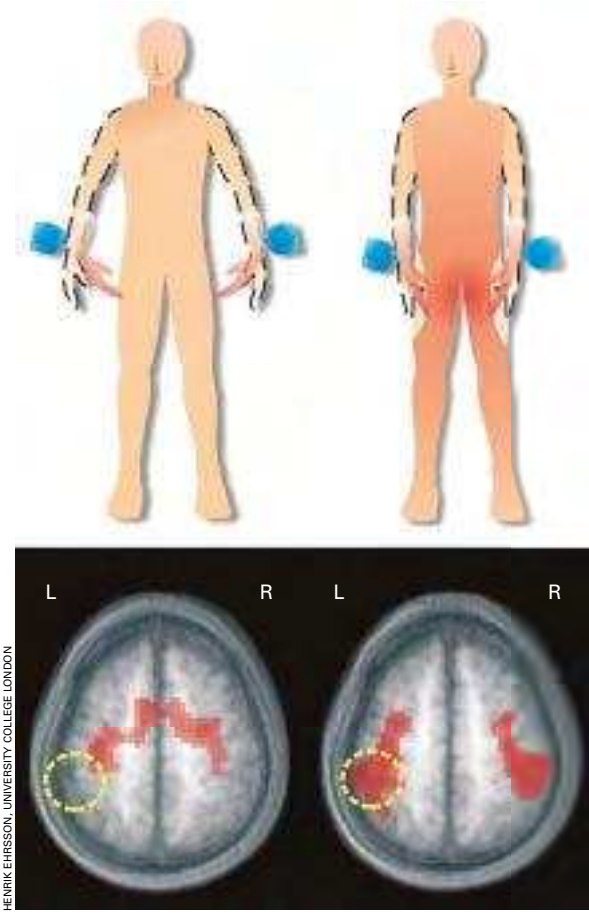
Mit Tricks können Hirnforscher bei Versuchspersonen das Gefühl erzeugen, dass deren Nase wie die von Pinocchio immer länger wird.

findung ein, ihre Nase beginne zu wachsen – bis zu einer gefühlten Länge von dreißig Zentimetern. Lackner bezeichnete dieses Phänomen als Pinocchio-Illusion – auch wenn die verlängerte Nase in diesem Fall nichts mit Lügen zu tun hatte.

Täuschung war dennoch im Spiel. Die Vibrationen gaukelten den zuständigen Dehnungsrezeptoren im Oberarmmuskel eine Streckung des Bizeps vor. Das Gehirn schloss daraus, dass der Arm ausgestreckt wurde. Da die Finger aber gleichzeitig die Nasenspitze berührten, wuchs die Nase scheinbar in die Länge.

Der Effekt ließ sich auch umkehren: Bei Anregung des muskulären Gegenspielers Trizeps brachte die wahrgenommene Armbeugung das Riechorgan scheinbar zum Schrumpfen. Wie Lackner zeigte, ließen sich nach dem gleichen Prinzip auch Form und Größe von anderen Körperteilen in der Vorstellung manipulieren.

MASSIMO GUERRA / ALS PINOCCHIO: ENZO SAVONA



HENRIK EHRSSON, UNIVERSITY COLLEGE LONDON

Werden Handgelenke elektrisch gereizt, scheinen sie sich zum Körper hin zu beugen (links oben). Liegen sie der Taille oder Hüfte an, so entsteht der Eindruck, dass diese sich zusammenzieht (rechts oben). In diesem Fall ist ein Bereich des linken Schläfenlappens aktiv (rechts unten), der ohne die Illusion stumm bleibt.

Forscher um Henrik Ehrsson vom Institut für Neurologie in London und Eiichi Naito von den ATR Computational Neuroscience Laboratories in Kioto haben diese Untersuchungen jetzt vertieft und zugleich ermittelt, welche Hirnregionen an der Konstruktion unseres Körperbilds beteiligt sind. Dieses Mal stimulierten die Forscher die Sehnen an den Handgelenken ihrer Probanden. Daraufhin klappten deren Hände wie von selbst scheinbar nach innen (Bild rechts). Lagen die Finger der Taille an, schnurrte diese zusammen – im Durchschnitt um etwa ein Viertel. Entsprechend schlanker kamen sich die Versuchspersonen vor.

Während des Experiments blickten Ehrsson und seine Kollegen mittels funktioneller Kernspintomografie auch in das Gehirn der Probanden. Während der Fehlempfindung konnten sie dabei stets eine erhöhte Aktivität im linken Scheitellappen nachweisen – in einem Bereich, der sich von der hinteren Zentral- bis zur vorderen Intraparietalfurche erstreckt. Der Effekt trat jeweils etwa drei Sekunden nach Beginn der Sehnenreizung auf – aber nur, wenn die Probanden ihre Taille auch berührten und sich plötzlich schlanker wähnten. Unmittelbar nach dem Experiment sollten die Versuchspersonen angeben, wie weit sich ihre Fingerspitzen scheinbar nach innen bewegt hatten. Wie sich erwies, registrierten diejenigen die größte Schrumpfung der Taille, bei denen die stärkste Aktivierung der betreffenden Hirnregion gemessen wurde.

Offenbar trägt also der hintere Teil des Scheitellappens zur Erzeugung des Körperbildes bei. Hier werden, wie die Untersuchungen von Ehrsson und Kollegen zeigen, sensorische Signale aus verschiedenen Körperregionen gesammelt und bewertet. Im konkreten Fall meldeten die stimulierten Spindelzellen an der Sehne eine Beugung des Handgelenks. Gleichzeitig signalisierten Rezeptoren an den Handinnenflächen und der Taille eine andauernde Berührung. Die aktivierten Hirnstrukturen lösten den Konflikt zwischen den widersprüchlichen Informationen, indem sie den Probanden das Gefühl vermittelten, an Taillenweite zu verlieren.

Gestörte Selbstwahrnehmung

Leider ist der Eindruck schöner Schlankheit nicht nur eine Illusion, sondern verschwindet auch sofort nach dem Ende der Sehnenreizung wieder. Schwergewichtigen kann mit der Methode also nicht wirklich geholfen werden. Zudem hängt unser Bild vom eigenen Körper auch von sozialen Faktoren ab. So tendieren selbst stark bierbäuchige Männer dazu, mit ihrer Körperform zufrieden zu sein, während viele nach medizinischen Kriterien normalgewichtige Frauen ihr Leben von Diäten diktieren lassen.

Dabei kann das Streben nach einer schlanken Taille sogar krankhafte Formen annehmen – wie bei der Magersucht, die mit einem gestörten Körperbild einhergeht. Betroffene fühlen sich ▷

▷ selbst dann noch zu dick, wenn sie bereits bis auf Haut- und Knochen abgemagert sind. Zur besseren Behandlung solcher Störungen kann die Studie von Ehrsson und seinen Kollegen sicher nicht direkt beitragen. Genauer zu wissen, wie das eigene Körperbild zu Stande kommt, sollte langfristig aber dennoch helfen, wirksame Strategien zur Korrektur einer falschen Selbstwahrnehmung zu entwickeln.

Achim G. Schneider ist promovierter Biologe und freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

CHEMIE

Ringbuch für asymmetrische Eselsohren

Manche Moleküle kommen in spiegelbildlichen Formen vor. Nur eine davon zu erzeugen, ist eine Herausforderung an die Chemiker. Münchner Forschern ist das bei einer lichtgetriebenen Reaktion nun erstmals ansatzweise gelungen.

Von Michael Groß

Wenn Sie Ihr eigenes Passfoto betrachten, sehen Sie dann dasselbe Gesicht wie jeden Morgen im Spiegel? Im Prinzip ja, denn unser Körper ist äußerlich spiegelsymmetrisch aufgebaut. Der Teufel steckt aber im Detail. Haben Sie zum Beispiel einen Seitenscheitel oder ist nur die eine Augenbraue gepierct, dann stimmen Porträt und Spiegelbild nicht mehr überein.

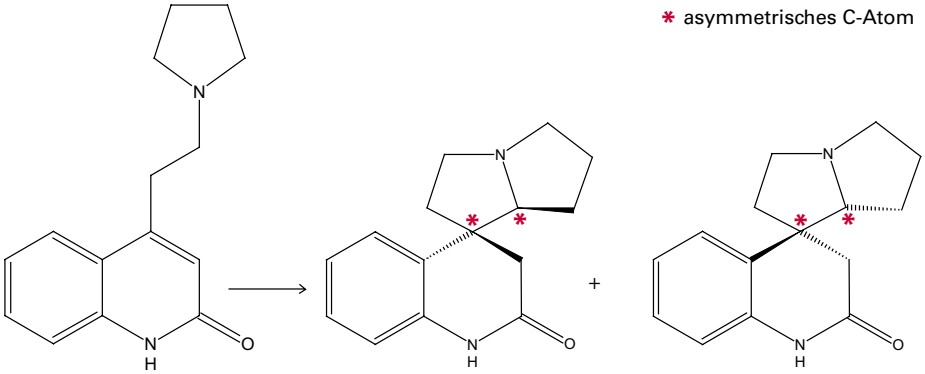
Könnten wir unser Konterfei genug vergrößern, um bis in die Zellen der Haut hineinzuschauen, wäre auch der letzte Rest von Symmetrie dahin. Fast alle Moleküle des Lebens – Nucleinsäuren, Proteine, Zucker – sind nämlich nicht mit ihrem Spiegelbild zur Deckung zu bringen. Chemiker nennen diese Eigenschaft Chiralität, was auf Deutsch so viel wie Händigkeit bedeutet; denn unsere beiden Hände bieten das beste Beispiel dafür.

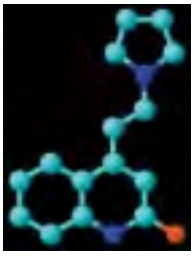
Da die Moleküle des Körpers chiral sind, benötigen Mediziner ebensolche Medikamente, um die gewünschten Heileffekte zu erzielen. Gleicht ein Zielort im Organismus geometrisch einer linken Hand, passt nur ein linker Handschuh darauf. Der rechte ist im besten Fall nutzlos, im schlimmsten kann er schwere Nebenwirkungen hervorrufen. Das zeigte sich in schrecklicher Weise bei der Contergan-Katastrophe der frühen 1960er Jahre: Das Spiegelbild des pharmakologisch aktiven Thalidomid-Moleküls, das Schwangeren als Schlafmittel und gegen die morgendliche Übelkeit verschrieben wurde, störte die Entwicklung der Gliedmaßen beim ungeborenen Kind.

Deshalb hat speziell die pharmazeutische Industrie großes Interesse an chemischen Synthesen, die das Zielmolekül ausschließlich – oder zumindest in hohem Überschuss – in der angestrebten Händigkeit erzeugen. Die nahe liegende Lösung ist die Verwendung von Katalysatoren, die selektiv denjenigen Reaktionspfad begünstigen, der zur jeweils gewünschten Geometrie führt.

Die Natur beherrscht diese Kunst perfekt. Die Enzyme unseres Stoffwechsels erzeugen ausschließlich Moleküle einer bestimmten Händigkeit – nicht zuletzt deshalb, weil sie selbst aus chiralen Aminosäuren aufgebaut sind. Für die Chemiker hingegen ist die Entwicklung technischer Katalysatoren, die Vergleichbares leisten, bis heute eine große Herausforderung.

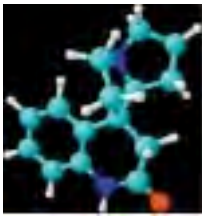
Immerhin gab es dabei schon erste Erfolge, die angesichts ihrer Bedeutung im Jahr 2001 mit dem Chemie-Nobelpreis gewürdigt wurden. Allerdings betreffen sie nur Reaktionen, die thermisch ablaufen, also die Energie aus der Wärmebewegung der Moleküle nutzen. Außer hohen Temperaturen kann aber auch Licht eine chemische Umsetzung antreiben. Ein bekanntes Beispiel aus der Natur ist die Photosynthese der Pflanzen.



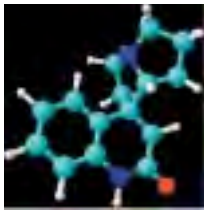


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ausgangssubstanz



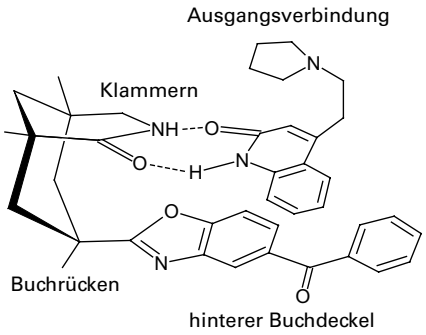
Reaktionsprodukt (Bild)

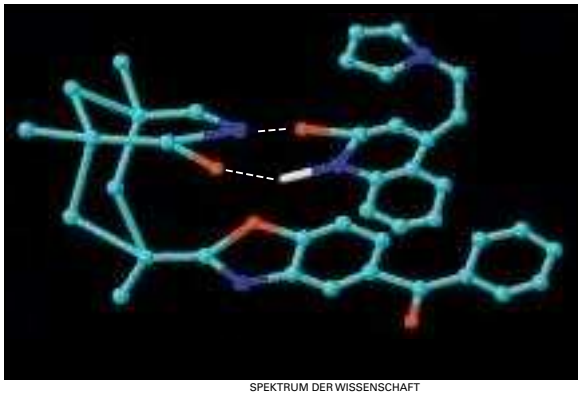


Reaktionsprodukt (Spiegelbild)

Bei der Bestrahlung des links gezeigten Moleküls, das drei Ringe enthält, bildet sich durch einen weiteren Ringschluss eine Verbindung, die in zwei spiegelbildlichen Formen vorkommt. Bei der einen ist der vierte Ring nach hinten und bei der anderen nach vorne aus der Papierebene geklappt.

Ein Katalysator in Form eines Ringbuchs begünstigt die Bildung eines der beiden spiegelbildlichen Moleküle. Der hintere Deckel dient als Auflage für die ebene Ausgangsverbindung, die mit zwei Klammern – Wasserstoffbrücken – in einer bestimmten Orientierung am Buchrücken befestigt wird. Die Reaktion kann aus räumlichen Gründen dann nur noch so ablaufen, dass der vierte Ring nach oben klappt.





SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Nun konnte eine Arbeitsgruppe um Torsten Bach von der Technischen Universität München erstmals auch eine photochemische Reaktion im Labor so lenken, dass von den zwei spiegelbildlichen Produkten das eine bevorzugt entsteht *(Nature, Bd. 436, S. 1139)*. Bei dieser Umsetzung wurde innerhalb eines Moleküls an drei schon vorhandene Ringe ein vierter gebildet (Bild links unten).

Chemie mit einem Blatt Papier

Ebenso wie unser an sich symmetrisches Gesicht durch ein bloßes Piercing oder einen Seitenscheitel seine Symmetrie verliert, sind oft (aber nicht immer) Kleinigkeiten für die Händigkeit organischer Verbindungen verantwortlich. So kann schon ein einziges Kohlenstoffatom einem Molekül Chiralität verleihen, wenn es mit vier unterscheidbaren Bindungspartnern verknüpft ist.

Das Reaktionsprodukt der Arbeitsgruppe von Bach enthält sogar gleich zwei solche »asymmetrischen« Kohlenstoffatome. Da an beiden eine spiegelbildliche Anordnung möglich ist, ergeben sich theoretisch insgesamt vier unterschiedliche Geometrien. Zwei davon scheiden aus räumlichen Gründen allerdings von vornherein aus. Ganz von selbst entstehen deshalb lediglich jene zueinander spiegelbildlichen Produkte, in denen die zwei asymmetrischen Kohlenstoffatome entweder beide links- oder beide rechtshändig sind, während die Kombinationen rechts/links und links/rechts gar nicht erst auftreten.

Die Münchner Forscher konnten nun dafür sorgen, dass auch von diesen beiden verbliebenen Möglichkeiten die eine bevorzugt wurde. Wie schafften sie das? Betrachten wir zunächst den Doppelring der Ausgangsverbindung. Er ist starr und flach wie das Papier, auf dem seine Strukturformel steht, und deshalb spiegelsymmetrisch relativ zur Papierebene. An dieser Symmetrie ändert auch der Fünfring nichts, der locker an einer Leine baumelt: Da er mit gleicher Wahrscheinlichkeit nach oben wie nach unten pendelt, liegt er im zeitlichen Mittel ebenfalls in der Papierebene. Wird er jedoch so an dem Doppelring befestigt, dass er auf der einen Seite herausragt und sich nicht auf die andere drehen lässt, dann entsteht ein chirales Molekül.

Wenn Sie mir das nicht glauben, können Sie ein einfaches Experiment machen. Nehmen Sie ein unbenutztes Blatt Papier – ein vollkommen achirales Objekt. Knicken Sie eine Ecke um, und Sie bekommen eine Händigkeit. Ein Blatt, bei dem die Ecke nach vorne gebogen wurde, lässt sich mit einem anderen, bei dem das Eselsohr nach hinten zeigt, nicht mehr zur Deckung bringen. Da können Sie noch so viel drehen und wenden.

Bach und seine Mitarbeiter haben für ihr Ausgangsmolekül sozusagen ein molekulares Ringbuch konstruiert, mit dem sie erreichen, dass die bewusste Ecke (fast) immer in dieselbe Richtung geknickt wird. Dieses Buch hat wie sein reales Vorbild einen hinteren Deckel (der vordere fehlt), auf den das Blatt zu liegen kommt. Rein aus Platzgründen kann man die Ecken deshalb nur nach vorne biegen. Am Buchrücken gibt es zudem zwei Klammern, die das Blatt in einer bestimmten Orientierung festhalten, sodass es sich ausschließlich an einer Stelle auf der gegenüberliegenden Seite kni- ▷

▷ cken lässt. Damit das geschieht, muss nur noch Licht einer bestimmten Frequenz einfallen. Derart beleuchtet, erzeugt das Ringbuch – ganz ohne Mitwirkung eines schlampigen Lesers – das gewünschte Eselsohr, das heißt, es befestigt den losen dritten Ring derart an den beiden anderen, dass er nach vorn aus deren Ebene herausragt.

Mit diesem Trick gelang es den Forschern, die gewünschte Händigkeit mit einem Überschuss von zwanzig Prozent gegenüber der spiegelbildlichen Form herzustellen. Demnach funktioniert das molekulare Ringbuch nicht ganz so perfekt wie geschildert, und die erreichte Stereoselektivität genügt noch nicht, um mit dem Katalysator zum Beispiel Medikamente herzustellen. Aber immerhin ist der Nachweis erbracht, dass im Prinzip auch auf photochemischem Weg asymmetrische Synthesen gelingen sollten. Damit haben die Chemiker im Wettstreit mit der Natur wieder ein kleines Stück Boden gut gemacht.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

NANOTECHNOLOGIE

Als die Tropfen laufen lernten

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Wie von Geisterhand bewegt, rast ein winziger Öltropfen auf einem Glasplättchen hin und her – und weckt damit Hoffnungen auf ein elegantes Antriebssystem für Nanoroboter.

Von Stefan Maier

Abermillionen winziger Roboter, die im menschlichen Blutkreislauf patrouillieren und Gerinnsel entfernen oder gezielt Krebszellen angreifen – diese Versprechung der Nanotechnologie begeistert oder erschreckt schon lange Forscher und interessierte Laien. Doch bevor die an den Reißbrettern des 21. Jahrhunderts entworfenen Minihelfer unser Leben verlängern oder erleichtern können, gibt es noch viele Hürden zu überwinden.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Eine davon ist die Energieversorgung der Winzlinge. Tatsächlich stellt der Antrieb mechanischer Geräte in der Nanowelt ein formidables Problem dar. Die bei lebensgroßen Robotern oder makroskopischen Maschinen bewährten Systeme zur Krafterzeugung lassen sich nicht beliebig verkleinern. Zwar zeigt die Natur selbst den Ausweg: Die biologischen Motoren unserer Zellen können durch molekulare Tricks chemische Energie direkt in nutzbare Arbeit verwandeln – etwa für den Antrieb von Motorproteinen. Doch ist es bisher nicht gelungen, dieses Kunststück technisch nachzuvollziehen.

Nun aber hat ein Team um Yutaka Sumino von der Universität Kioto einen bedeutenden Schritt in Richtung Nanomotor getan – mit einem System, das ebenso ungewöhnlich ist, wie es durch seine Einfachheit besticht *(Physical Review Letters, Bd. 94, Artikel 068301)*. Die Wissenschaftler konnten einen Öltropfen durch chemische Energie direkt – also ohne den Umweg über heiße Gase oder Dämpfe – in periodische Bewegungen versetzen.

Das Geheimnis hinter ihrem Erfolg ist nichts weiter als die wohlbekannte Abstoßung zwischen Öl und Wasser sowie der aus der Schulchemie bekannte Aufbau von Seifenmolekülen. Diese »Zwitter« bestehen aus einem hydrophilen Kopf, den es zu Wassermolekülen hinzieht, und einem hydrophoben, Wasser meidenden Schwanz.

In ihrem Experiment bedeckten die japanischen Forscher den Boden einer Petrischale mit einer wässrigen Lösung solcher Tenside. Ein Teil davon lagerte sich dicht an dicht an die Glasoberfläche an. Weil diese in der Regel negativ geladen ist, richteten sich die Seifenmoleküle dabei mit ihrem Kopfteil zum Boden der Schale hin aus, während die hydrophoben Fortsätze wie Stifte nach oben ragten. In die derart präparierte Rennstrecke setzten Sumino und seine Kollegen dann mit einer Pipette einen kleinen Öltropfen.

◀ **Ein Öltropfen am Boden einer mit Seifenlösung gefüllten Schale bewegt sich auf einer zufälligen Bahn. Wird er auf ein schmales Glasplättchen gesetzt (Grafik links), läuft er dagegen hin und her (rechts).**

Am Boden der Schale bildet sich ein Flor aus aneinander gereihten Seifenmolekülen, die ihren hydrophoben, Wasser meidenden Schwanz nach oben recken. Damit ziehen sie den gleichfalls hydrophoben Öltropfen an. Dieser bewegt sich deshalb auf sie zu und saugt sie auf. Hinter ihm ist die Glasoberfläche dann unbedeckt. Wegen ihres hydrophilen, Wasser liebenden Charakters stößt sie den Tropfen ab und treibt ihn so zusätzlich voran. Binnen Kurzem lagern sich wieder Seifenmoleküle aus der Lösung an den freien Stellen an und erneuern den Flor.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Dieser begann sich sofort in zufälliger Richtung hin und her zu bewegen, wobei sich seine Bahn sogar überkreuzen konnte. Nach rund einminütiger Irrfahrt stoppte er allerdings abrupt.

Die Forscher wiederholten dieses Experiment mehrfach, um eventuelle Gesetzmäßigkeiten in der Bewegung zu entdecken. Tatsächlich stellten sie fest, dass der Tropfen, wenn er auf seiner Zufallsroute an den Rand der Schale stieß, an der Glaswand entlang im Kreis herumzulaufen begann. Dies brachte Sumino und seine Kollegen auf die Idee, anstatt einer Petrischale einen schmalen, rechteckigen Glasbehälter als Rennstrecke zu verwenden. Damit war die Bewegung auf eine Dimension beschränkt. Der Tropfen sauste folglich viele Dutzend Male zwischen beiden Enden des Behälters hin und her, bevor er zum Stillstand kam.

Der Grund für das hektische Auf und Ab ist der schon seit dem 19. Jahrhundert bekannte Marangoni-Effekt, wonach bei einem Gemisch aus Öl und Wasser spontane Fluktuationen in der Oberflächenspannung auftreten. Sobald die Forscher also den Tropfen in ihre Petrischale einbrachten, begann dieser zu zittern. Das Oszillieren verwandelte sich freilich sofort in eine gerichtete Bewegung. Die Forscher hatten den Tropfen nämlich mit Kaliumiodid versetzt, sodass sich die Seifenmoleküle gut darin lösten (Bild oben). Dadurch saugte er diese wie ein Staubsauger von der Glasoberfläche auf.

Infolgedessen kam es – in Fahrtrichtung betrachtet – zu einem Unterschied ▷

▷ in den Oberflächenspannungen zwischen der Vorder- und Rückseite des Öltropfens. Hinter ihm war die Glasoberfläche frei von Seifenmolekülen und somit hydrophil. Dies verursachte einen Abstoßungseffekt, während die hydrophoben »Stifte« auf der Vorderseite anziehend wirkten.

Den Beweis für die Richtigkeit dieser Erklärung lieferte die genaue Beobachtung des Tropfens per Videokamera. Dabei stellte sich heraus, dass der Kontaktwinkel mit der Oberfläche vorne kleiner war als hinten – ein unzweideutiges Indiz für unterschiedliche Oberflächenspannungen.

Der Tropfen hinterließ somit bei seiner Bewegung über die Glasoberfläche eine tensidfreie Spur. Sie blieb jedoch nicht lange unbedeckt. Schon nach kurzer Zeit hatten frei schwimmende Seifenmoleküle aus der Lösung sie wieder aufgefüllt. Dadurch war sie quasi mit neuem Treibstoff versorgt, der den Tropfen auf seinem Rückweg weiter in Bewegung hielt.

Wieso stoppte er dann nach etwa einer Minute? Die Antwort ist einfach: Nach dieser Zeit war der Tropfen mit Seifenmolekülen gesättigt, sodass er keine weiteren aufnehmen und die Glasoberfläche nicht mehr abgrasen konnte. Dadurch verschwand die Spannungsdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite.

Die Forscher sind sich natürlich bewusst, dass es von ihrem rasenden Tropfen zu einem echten Nanomotor noch ein weiter Weg ist. Doch wurde ein Anfang gemacht, und die Grundidee scheint viel versprechend: Nanomaschinen müssen die chemische Energie ihrer Umgebung anzapfen. Und wie die Erfahrung lehrt, liegen zwischen Petrischale und technischer Umsetzung manchmal wirklich nur wenige Jahre.

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).

ANGEMERKT

Klingende Kissen für die Kampfmoral

Wie fürsorgliche Militärs traumatisierten Soldaten zu einem guten Schlaf verhelfen

»Mit Musik geht alles besser« hieß eine Sendung im Süddeutschen Rundfunk, die oft im Autoradio dudelte, wenn ich als Teenager mit meinen Eltern eine Spritztour machte. Damals fand ich das Motto echt ätzend und die Sendung zum Erbrechen, was aber auch an den dümmlichen Schlagern lag, die darin geboten wurden. Heute als Erwachsene kann ich nicht länger bestreiten, dass Musik – die richtige natürlich! – manches erleichtert und angenehm entspannt.

Das gilt übrigens nicht nur für den Menschen. Kühe etwa, so weiß man seit einigen Jahren, geben mehr Milch, wenn sie mit Musik beschallt werden. Das Erstaunlichste dabei: Sie beweisen einen ausgesprochen guten Geschmack, der gar nicht so weit von meinem eigenen entfernt ist. Vor allem Mozart hat es den Wiederkäuern angetan, während ihre Euter bei den Wildecker Herzbuben tendenziell eher streiken. Auch auf Punkmusik von den Toten Hosen steht das Rindvieh – im Gegensatz zu mir – nicht unbedingt.

Was der Kuh recht ist, sollte Hund und Katze billig sein. Wie immer, wenn es um die Kommerzialisierung von Forschungsergebnissen geht, haben die USA als Erste die Zeichen der Zeit erkannt. Und so bietet neuerdings der Internet-Radiosender DogCatRadio.com Entspannung für stressgeplagte Haustiere: Zu den Klängen von »Who let the dogs out (wuff, wuff, wuff)« von den Baha Men oder Elvis Presley's »You ain't nothing but a hound dog« erholen sich durch den Hundefriseur neurotisierte Pudel samt Omis Kuschelwauwau.

Doch kehren wir zurück zur Krone der Schöpfung, dem Menschen. Schon Platon und Aristoteles priesen die heilsame Wirkung der Töne auf das Gemüt, und die Bibel zeigt uns in der Geschichte über den depressiven König Saul und seinen musikalischen Diener David das frühe Beispiel einer Musiktherapie: »Immer, wenn der böse Geist über Saul kam, griff David zur Harfe. Dann wurde es Saul leichter ums Herz und der böse Geist verließ ihn« (1. Sam 16,23).

Ein weiteres bekanntes Beispiel liefert Johannn Sebastian Bach. Er hat, wie es heißt, einst seine Goldberg-Variationen für den Baron von Keyserling komponiert, um dem von Schlaflosigkeit geplagten Edelmann die zwanglose Rückkehr in Morpheus' Arme zu ermöglichen. Schlagen wir den Bogen vom Barock zur Postmoderne, so ist der dänische Komponist Niels Eje nun in die Fußstapfen des Thomaskantors getreten. Er hat laut Nachrichtenagentur Reuters das »weltweit erste ärztlich dokumentierte Kissen mit Musik zur Entspannung und zum Erleben« erfunden. Vertrieben wird es von der Firma MusiCure. Wie deren Internetseite zu entnehmen ist, spielt die Hightech-Schlummerrolle »Musik, die eigens im Hinblick auf ihre entspannende und Erlebnisse schaffende Wirkung komponiert wurde«. Als Kunden stellt sich das Unternehmen vor allem Krankenhäuser und psychiatrische Kliniken vor. Dort sollen die »genrelosen Klangbilder« und Naturgeräusche wie tropfendes Wasser und Vogelgezwitscher, untermalt von säuselnden Melodien, die Leiden von Patienten lindern helfen.

Doch das Potenzial der Erfindung ist damit längst nicht ausgereizt. So hat die dänische Regierung mit sicherem Gespür bereits ein anderes viel versprechendes Einsatzgebiet ausgemacht: Sie beglückte jetzt ihre Truppenkontingente im Kosovo und im Irak mit jeweils zehn klingenden Kissen. Die Soldaten werden begeistert sein. Zwar hilft das Geschenk nichts gegen den Irrsinn des Terrors, die tagtägliche Gewalt und den allgegenwärtigen Schrecken. Aber wenigstens können die traumatisierten Helden jetzt friedlich schlafen, um am nächsten Morgen wieder entspannt dem Tod ins Auge zu sehen. Das erinnert mich an ein anderes Musikstück aus meiner ganz frühen Kindheit, einen betörend sanft gesungenen Limerick von Schobert & Black: »Ein Bauer aus Frankfurt am Main / schlachtete des Abends ein Schwein. / Doch er summte zuvor / ihm ganz leise ins Ohr: / Schlafe, mein Prinzchen, schlaf ein.«

Mit Musik geht eben doch alles besser – sogar das Kämpfen, Töten und Sterben.

Stephanie Hügler

Die Autorin arbeitet als freie Journalistin in Heidelberg.

Springers
EINWÜRFE

von Michael Springer

Weltuntergang durch Teilchenphysik?

Diese Gefahr besteht doch eher nicht.

Während der Entwicklung der amerikanischen Atombomben diskutierten am Manhattan-Projekt beteiligte Physiker am Rande auch, ob die erste von Menschen ausgelöste Kettenreaktion die gesamte Atmosphäre erfassen und alles Leben vernichten würde. Doch stuften sie das Risiko eines nuklearen Weltenbrands als gering ein; zudem führte man gerade Krieg, war also nicht in Stimmung für große Skrupel und lange Debatten.

Im Prinzip erhebt sich mit jedem hypothetischen Teilchen, das die Theoretiker seither auf ihrer Suche nach »neuer Physik« postulieren, erneut die Frage, ob dessen künstliche Erzeugung den Weltuntergang bedeuten könnte. So ließ das Brookhaven National Laboratory vor einigen Jahren durch ein Expertenkomitee prüfen, ob Experimente mit dem Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) die Stabilität der Natur gefährden. Wenn Goldkerne fast mit Lichtgeschwindigkeit kollidieren, hoffen die Physiker ein Quark-Gluon-Plasma und Zustände wie kurz nach dem Urknall zu beobachten. Dabei könnten theoretisch kleine Schwarze Löcher oder auch exotische Partikel namens Strangelets entstehen.

Der Brookhaven-Report gab jedoch Entwarnung: Vorläufig bestehe keine Gefahr, dass unser Planet zusammen mit uns von gefräßigen Minilöchern verschlungen oder durch ein »Strangelet-Desaster« in seltsame Materie verwandelt würde. Schließlich löse die kosmische Strahlung seit mindestens vier Milliarden Jahren – so lange gibt es Leben auf der Erde – noch viel energiereichere Prozesse aus als der RHIC, ohne dass davon unsere Welt bisher untergegangen wäre.

Dem haben nun der US-Physiker Max Tegmark und der britische Philosoph Nick Bostrom energisch widersprochen: Der Brookhaven-Report vergesse den so genannten Beobachtungsauswahleffekt. Dass die Erde so lange überlebt hat, könne auch pures Glück sein. Vielleicht seien wir im Universum die rare Ausnahme, während überall sonst kosmische Katastrophen, die alle Lebensgrundlagen vernichten, in viel kürzeren Abständen auftreten mögen *(Nature, Bd. 438, S. 754)*.

Doch bevor uns jetzt der Schreck in die Glieder fährt, weil wir jederzeit die Apokalypse gewärtigen müssen, machen Tegmark und Bostrom gleich wieder einen Rückzieher. Wären kosmische Katastrophen extrem häufig, müssten die meisten Planeten mit intelligenten Bewohnern, die es dennoch irgendwo im All geben mag, aus statistischen Gründen sehr viel früher entstanden sein als die Erde und unsere Zivilisation. Ein lebensfreundlicher Planet, der sich erst mehr als 8 Milliarden Jahre nach dem Urknall bildete und noch einmal 4,5 Milliarden Jahre brauchte, um intelligente Lebewesen hervorzubringen, erschiene da fast ausgeschlossen.

Auf diesem Umweg stellen Tegmark und Bostrom erleichtert fest, dass kosmische Apokalypsen insgesamt doch sehr selten sein dürften: Höchstens einmal in einer Jahrmilliarde könnte uns eine ereilen. Ein durch irdische Teilchenbeschleuniger ausgelöster Weltuntergang wäre nach Auskunft aus Brookhaven sogar noch tausendmal unwahrscheinlicher. Da fällt uns wahrhaftig ein Stein vom Herzen.

Michael Springer

Doch Vorsicht: Die Entwarnung gilt natürlich nur für Katastrophen, die durch kosmische Strahlung und Physikexperimente ausgelöst werden. Ungleich riskanter sind die Großversuche der Menschheit, sich – wie einst im Kalten Krieg – an den Rand der nuklearen Selbstvernichtung zu bringen oder durch hemmungslosen Technikwahn die planetare Biosphäre zu ruinieren. Dagegen ist die Gefahr durch Strangelet-Desaster oder Schwarze Löcher im Labor ein Klacks.

Die heimliche Seuche

Chlamydien gehören zu den weltweit verbreitetsten Erregern, sind aber wenig bekannt: An Folgen der von ihnen übertragenen Erkrankungen leiden Millionen Menschen.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Von David M. Ojcius,
Toni Darville und Patrik M. Bavoil

Fragt man den deutschen Normalbürger nach Chlamydien, reagiert er vermutlich entweder mit Achselzucken – oder peinlich berührt. Er kennt nämlich diese Mikroben, wenn überhaupt, zumeist nur als Verursacher einer der weltweit häufigsten sexuell übertragenen Krankheiten. Doch die Mitglieder dieser Bakteriengattung können eine ganze Reihe schwer wiegender Erkrankungen hervorrufen.

Fragt man eine afrikanische Mutter nach Chlamydien, wird sie vielleicht erzählen, dass ihre beiden kleinen Kinder an einer schmerzhaften Bindehautentzündung leiden, die von Fliegen übertragen wird. Das Trachom, auch Ägyptische Augenkrankheit genannt, wird von bestimmten Untergruppen der gleichen Chlamydien-Art verursacht, die auch Genitalinfektionen hervorruft. Eine andere Art hingegen verbreitet sich durch Tröpfcheninfektion und verursacht in den Industrienationen Erkrankungen der Atemwege, darunter Bronchitis und atypische Lungenentzündung; etwa zehn Prozent der nicht im Krankenhaus erworbenen Pneumonien sind ihr anzulasten. Umstritten ist, ob diese Art auch etwas mit Arteriosklerose zu tun hat, die zu Herzinfarkt und Schlaganfall führen kann (siehe Kasten S. 34).

Als bakterielle Erreger lassen sich Chlamydien mit Antibiotika bekämpfen. Nur bleibt ein Befall leider oft unentdeckt und unbehandelt. Dies hat unterschiedliche Gründe: Die Genitalinfektionen verursachen anfangs selten Symptome, verbreiten sich daher auch leicht weiter, während es den Entwicklungsländern, wo das Trachom ein Problem ist, häufig an adäquater medizinischer Versorgung und Hygiene mangelt. Folglich werden viele der schätzungsweise 600 Millionen Menschen, die sich mit Chlamydien-Stämmen infiziert haben, erst behandelt, wenn die gesundheitlichen Schäden nicht mehr rückgängig zu machen sind.

Es ist unrealistisch zu erwarten, dass jemals alle sexuell übertragbaren Chlamydien-Infektionen erkannt und behandelt werden oder dass verbesserte Hygienestandards alleine den Trachom-Erreger in Entwicklungsländern bald zum Verschwinden bringen. Die besten Chancen, die weitere Verbreitung einzudämmen, bietet die Entwicklung von Impfstoffen oder anderen präventiv wirksamen Medikamenten. Diese sollen verhindern, dass aus einer Ansteckung eine kritische Infektion wird.

Für ihre Suche brauchen die Wissenschaftler genauere Kenntnis, wie Chlamydien auf molekularer Ebene funktionieren, sich vermehren und krank machen. Dies hat sich jedoch als schwieriges Unterfangen erwiesen, denn die winzigen Bakterien sind äußerst raffinierte Gegner, die zum Beispiel Strategien entwickelt haben, um der Vernichtung durch das Immunsystem zu entgehen. Sie sind zudem ausgesprochen schwer außerhalb des Organismus zu untersuchen. Forschungsergebnisse der letzten fünf Jahre, darunter die vollständig entzifferten Genome verschiedener Chlamydien-Stämme, helfen jedoch inzwischen, diese Probleme zu überwinden. Und sie nähren berechtigt die Hoffnung auf neue Möglichkeiten medizinischer Vorbeugung.

Eines der Haupthindernisse bei der Entwicklung eines Impfstoffs ist die heimtückische Art, wie Chlamydien ihre

Zellen in verschiedenen Bereichen des Körpers werden von Chlamydien befallen. Vor allem verursachen die winzigen kugeligen Bakterien Infektionen am Auge, in der Lunge und im Genitaltrakt – ein häufiger Grund für Unfruchtbarkeit.

MINDY JONES

schädliche Wirkung entfalten. Tetanus- oder Cholerabakterien überschwemmen den Körper mit Toxinen, die essentielle Zellfunktionen stören. Chlamydien hingegen schädigen Zellen und Gewebe nicht direkt, vielmehr lösen sie eine übermäßige Abwehr aus: Das Immunsystem versucht durch Entzündungsreaktionen die Bakterien in Schach zu halten, solange noch welche – und seien es auch nur wenige – im Körper anwesend sind. Gerade diese Art der Bekämpfung jedoch ist es, die auf die Dauer irreversible Schäden verursacht. Vorbeugende Impfstoffe bereiten bekanntlich das Immunsystem auf den fraglichen Erreger vor, sodass es im Ernstfall sogleich schlagkräftig dagegen vorgehen kann. Bei einer Ansteckung mit Chlamydien könnte jedoch die entzündliche Komponente einer solchen Abwehrreaktion mehr schaden als nützen – gleichgültig, wo die Infektion stattfindet, im Genitaltrakt, an den Augenlidern oder anderswo im Körper.

Unwissentlich Überträger

Eingeleitet wird die Entzündungsreaktion durch bestimmte Immunzellen. Sie geben Cytokine ab, kleine Proteine, die weitere Abwehrzellen an den Ort der Infektion locken. Diese versuchen, das Gewebeareal um den Infektionsherd abzuschotten und so die Bakterien am Sichausbreiten zu hindern. In der Haut äußert sich ein solches Geschehen in Form der bekannten äußerlichen Entzündungszeichen: Rötung, Schwellung und Überwärmung. Die Cytokine können zudem zu Vernarbungen beitragen, weil sie einen Reparaturprozess, die Vermehrung von Ersatzbindegewebe, mit anregen.

Im Genitaltrakt fällt die Entzündung anfangs meist nicht auf. In den USA stecken sich jährlich etwa 3,5 Millionen Menschen mit dieser Chlamydiose an, in Deutschland schätzungsweise 300 000. Bis zu 90 Prozent bleiben symptomfrei und geben unwissentlich den Erreger weiter. Bei Männern infizieren die winzigen Bakterien häufig die Harnröhre, was sich durch leichtes Brennen beim Wasserlassen bemerkbar machen kann. Frauen bemerken oft nichts von der Infektion, die von der Scheide bis in die Eileiter aufsteigen kann. Nicht selten wird die Chlamydiose erst bei der Suche nach den Ursachen einer Unfruchtbarkeit erkannt. In anderen Fällen führt die chro- ▷

▷ nische Entzündung und Vernarbung der Eileiter zu anhaltenden Schmerzen im Beckenbereich. Zudem ist das Risiko einer Eileiterschwangerschaft erhöht, die lebensbedrohliche Blutungen verursachen kann. Sie ist die wichtigste Ursache mütterlicher Todesfälle im ersten Drittel der Schwangerschaft.

Entzündungen der Augenlider fallen eher auf. Schätzungsweise 150 Millionen Menschen in den ärmeren Ländern der heißen Klimazonen sind erkrankt, aber oft mangelhaft medizinisch versorgt. Unzureichende Hygiene begünstigt die Übertragung der Erreger vor allem über die Hände infizierter Kinder und ihrer Mütter oder auch durch Fliegen und Mücken. In der Westhälfte Europas und in den USA, wo ein gutes öffentliches Gesundheitswesen und bessere Hygienestandards existieren, kommt das Trachom praktisch nicht vor. Durch die Infektion entzündet sich die Bindehaut des Auges unter anderem an der Innenseite des Oberlids. Bei längerer oder wiederholter Erkrankung kommt es mit den Jahren zu narbigen Schrumpfungen des Lids. Kehren sich dabei die Wimpern nach innen, reiben sie an der Hornhaut, was auf Dauer zur Erblindung führen kann, oft Jahrzehnte nach der Erstinfektion.

Vergessliche Abwehr

Da die schweren Folgen von Chlamydien-Infektionen im Wesentlichen auf die Entzündungsreaktionen zurückzuführen sind, muss ein künftiger Impfstoff die Erreger in Schach halten, ohne solche inflammatorischen Prozesse stärker auszulösen. Ideal wäre eine Art Immunmodulation, bei der die Entzündung nur in dem Maße stimuliert wird, wie es den anderen Abwehreinheiten hilft, die Bakterien zu eliminieren.

Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt bei Infektionen mit Erregern wie Chlamydien sind Faktoren, die entweder eine Ausschüttung entzündungsfördernder Cytokine anregen oder nach Elimination der Bakterien das Ganze zurückfahren. In den letzten Jahren wurden einige kleine Moleküle entdeckt, die normalerweise einen derartigen Prozess im Körper anwerfen oder drosseln. Nun gilt es, Medikamente zu entwickeln, die wiederum deren Aktivität regulieren. Ein solcher Wirkstoff könnte, nachdem ein Antibiotikum die Chlamydien eingedämmt hat, das Entzündungsgeschehen künstlich unterbinden und dadurch weitere Schäden am Gewebe verhindern.

Chlamydien besitzen noch andere Eigenschaften, welche die Entwicklung eines wirksamen Impfstoffs erschweren. Wer an Mumps oder Masern erkrankt war oder gegen diese Krankheiten geimpft wurde, ist gewöhnlich für den Rest des Lebens immun. Nicht so bei einer Chlamydiose. Dem Abwehrsystem fällt es schwer, diese Bakterien vollständig zu eliminieren, und immun bleibt man nur für etwa ein halbes Jahr. Daher kann eine scheinbar ausgeheilte Infektion nach Monaten oder Jahren wieder aufflammen, und auch gegen erneute Ansteckung ist man kaum gefeit. Da die natürlichen Reaktionen des Immunsystems hier keine Langzeitprotektion ermöglichen, ist auch von einer Impfung, die diese Reaktion lediglich stimuliert, kaum eine dauerhafte Wirkung zu erwarten. Ein Vakzin müsste vielmehr eine schlagkräftigere und nachhaltigere Immunantwort auslösen, ohne stärkere Entzündungen zu provozieren.

Wenn der Körper erstmals mit bestimmten Erregern in Kontakt kommt, sei es in Form eines Impfstoffs oder einer natürlichen Infektion, muss er sich das Feindbild gewissermaßen merken, um gegen künftigen Befall durch denselben Keim gewappnet zu sein. Ein wichtiger Weg führt dabei über so genannte B-Zellen, weiße Blutkörperchen, die Antikörper erzeugen können. Sofern ihr spezieller Antikörper zu Komponenten des Eindringlings passt, sich also gezielt gegen ihn richtet, wandelt sich ein Teil dieser Immunzellen in »Gedächtniszellen« um. Diese patrouillieren im Idealfall lebenslang im Körper, stets bereit, bei einer neuerlichen Konfrontation Antikörper freizusetzen, die sich an die Erreger anheften, sie abfangen und für andere Immunzellen als zu zerstörendes Ziel markieren.

Mit dem Fahrstuhl in die Zelle

Das Antikörpersystem funktioniert bei etlichen Krankheitserregern sehr gut, vor allem bei jenen Bakterien, die sich außerhalb der Zellen des Wirtsorganismus aufhalten und vermehren. Bei Mikroben, die im Innern von Wirtszellen parasitieren, bleiben den Antikörpern theoretisch zwei Chancen: bei jedem neuen Befall den Erreger abzufangen, bevor er in eine Wirtszelle eindringt, oder später seine Nachkommen, wenn sie die Zelle verlassen, um weitere zu infizieren. Leider ist diese Abwehrschiene in beiderlei Hinsicht nicht sehr effektiv, wenn es um Chlamydien geht, die gleichfalls innerhalb von Zellen leben.

Um zu verhindern, dass Chlamydien sich langfristig darin verstecken und später wieder vermehren, müsste ein Impfstoff neben dem Antikörpersystem vermutlich auch die so genannte zelluläre Immunantwort stärken. Dieser zweite Arm des Immunsystems dient unter anderem zur Elimination von Viren, die sich alle in Zellen einnisten. Er arbeitet mit T-Killer- und T-Helferzellen sowie großen, als Makrophagen bezeichneten Fresszellen. In konzertierter Aktion werden befallene Zellen abgetötet und beseitigt. Doch leider gelingt auch diesem Trio allzu oft keine vollständige Elimination; überlebende Zellen werden aber leicht zur Brutstätte für neue Chlamydien.

Einen Impfstoff zu entwickeln, der eine stärkere zelluläre Immunantwort als von Natur aus hervorruft, ist eine enorme Herausforderung. Meist induzieren vorhandene Vakzine zwar gezielte Antikörperreaktionen. Doch eine verlässliche zelluläre Immunität zu etablieren hat sich schon bei vielen Infektionskrankhei-

IN KÜRZE

▶ Unbehandelt verursachen **Chlamydien-Infektionen schwere Folgeschäden.** Durch sie sind schätzungsweise sieben Millionen Menschen weltweit erblindet, und alljährlich werden allein 10000 US-Amerikanerinnen unfruchtbar. Die Bakterien verursachen zudem rund zehn Prozent aller Lungenentzündungen in Industrieländern.

▶ Die meisten **Infizierten** werden erst behandelt, wenn bereits Komplikationen eingetreten sind. Entweder bemerken sie die Infektion zu spät oder sie haben keinen Zugang zu adäquater Gesundheitsversorgung.

▶ Globale Aufklärungskampagnen und **Verbesserung der Hygiene** sind sicherlich wichtig, um die Ausbreitung des Erregers einzudämmen. Doch vermutlich bieten einzig andere Maßnahmen zur Vorbeugung, wie die **Entwicklung effektiver Impfstoffe**, die Chance, die Chlamydiose auszurotten.

Krankheiten, ausgelöst durch Chlamydien

Erregerspezies	Erkrankung	geografische Verbreitung	Übertragungsweg	Fälle
Chlamydia pneumoniae	atypische Lungenentzündung; Beteiligung an Arteriosklerose fraglich	weltweit	Einatmen der Erreger über feine, von Infizierten ausgehusteten Tröpfchen	etwa 10 Prozent aller Lungenentzündungen in den Industrieländern; in Deutschland grob geschätzt jährlich 40000 bis 50000 Fälle, in den USA etwa 300000 Neuinfektionen
Chlamydia psittaci	Papageienkrankheit oder Ornithose: fiebrige grippeartige Erkrankung, oft eine Entzündung der Lunge, aber auch von Leber, Herzmuskel oder Hirngewebe	weltweit	Einatmen der Erreger mit Aerosolen oder Staub; Bisse infizierter Vögel; Kontakt mit Gefieder oder Fleisch infizierter Vögel	verbreitet bei Vögeln, aber auch bei fast allen Haustieren; Übertragung auf den Menschen selten, jedoch bei Stämmen aus Vögeln potenziell tödlich; in den USA 50 bis 100 Neuerkrankungen, in Deutschland etwa 100 Fälle jährlich
Chlamydia trachomatis (Serotypen A–C)	Trachom, eine schmerzhafte Augeninfektion; anfänglich Bindehautentzündung, später narbige Veränderung des Lids und dann der Hornhaut, was zur Erblindung führen kann	Südostasien, Südamerika, Indien, Mittlerer Osten, Afrika; in Mitteleuropa und den USA sehr selten	direkter Kontakt mit Sekreten infizierter Personen; Übertragung auch durch Fliegen oder Kontakt mit kontaminierten Textilien	weltweit mehr als 150 Millionen Erkrankte; schätzungsweise 7 bis 9 Millionen durch Trachom erblindet; in Regionen mit guten hygienischen Verhältnissen extrem selten
Chlamydia trachomatis (Serotypen D–K)	sexuell übertragbare Infektion des Urogenitaltrakts; bei Neugeborenen Bindehautentzündung oder Lungenentzündung	weltweit	Sexualkontakte; Übertragung von Mutter zu Kind bei der Passage durch den Geburtskanal	weltweit 50 bis 90 Millionen Neuinfektionen pro Jahr, davon 3,5 Millionen in den USA und schätzungsweise 300000 in Deutschland; jährlich werden allein in den USA mehr als 10000 Frauen dadurch unfruchtbar
Chlamydia trachomatis (Serotypen L1–L3)	Lymphogranuloma venereum, eine Infektion der Lymphknoten im Genitalbereich	Asien, Afrika, Südamerika, Mittelamerika; in Deutschland und den USA sehr selten	Sexualkontakte	weltweite Zahl der Neuerkrankungen unbekannt; in den USA 300 bis 500 Fälle pro Jahr, in Deutschland so gut wie keine

QUELLE: ROBERT KOCH INSTITUT UND WWW.MED.SC.EDU:85/MAYER/CHLAMYD.HTM

ten als Problem erwiesen. Besonders schwierig ist das im Fall von Chlamydien, da sie spezielle Schutzmechanismen gegen diese Schiene des Immunsystems entwickelt haben.

Wie auch einige andere bakterielle Erreger befallen Chlamydien Epithelzellen. Diese bilden die Deckschicht der inneren und äußeren Oberflächen des Körpers. Im Falle der Clamydien sind das solche des Genitaltrakts, der Augenlieder und der Lunge. Der Erreger veranlasst die Zellen, ihre äußere Membran einzudellen, ihn zu umschließen und eingehüllt in das Membranbläschen aufzunehmen. Gesunde Zellen versuchen die Eindringlinge gewöhnlich zu vernichten, indem sie die so genannte Eintrittsvakuole mit Lysosomen verschmelzen. Das sind so etwas wie Verdauungssäckchen, die Enzyme zum Abbau von Proteinen, Fetten und Erbsubstanz enthalten. Viele der dabei entstehenden Proteinfragmente werden – gebunden an spezielle Trägermoleküle – an die Zelloberfläche geschafft und patrouillierenden T-Killer- und T-Helfer-Zellen präsentiert. Ergeben sich daneben weitere Anzeichen für Probleme, organisieren die T-Zellen einen Angriff gegen die mutmaßlich infizierten Zielzellen.

Fettklau zur Tarnung

Chlamydien allerdings verhindern irgendwie, dass Lysosomen mit ihrer Eintrittsvakuole verschmelzen. So können sich die winzigen Bakterien abgeschottet vom Rest der Zelle reichlich vermehren. Da die Lysosomen keine bakteriellen »Verdauungsreste« aufweisen, die an der Zelloberfläche präsentiert werden könnten, erkennen die Wächter des Immunsystems nicht, dass sich in der Zelle Krankheitserreger befinden. Zu verstehen, wie die Chlamydien gedeihen und die Fusion ihrer Heimstatt mit Lysosomen vermeiden, könnte neue Ansätze zur Bekämpfung liefern. Die jüngst sequenzierten Chlamydien-Genome und andere Befunde tragen dazu bei.

In der Abfolge der Bausteine in der Erbsubstanz DNA verbirgt sich die Bauanleitung für die Proteine, die eine Zelle als Konstruktionselement und für ihren Betrieb braucht. Die Sequenz der für Proteine codierenden Gene verrät daher viel über die Funktionsweise eines Organismus. Ein Team von Forschern, darunter Ru-Ching Hsia und einer von uns (Bavoil) an der Universität von Maryland in Baltimore, entdeckte ein besonders wichtiges Element der Chlamydien durch Genvergleich mit größeren Bakterien wie Salmonellen, die Lebensmittelvergiftungen verursachen. Aus gewissen Ähnlichkeiten war nämlich zu schließen, dass Chlamydien über alle Zutaten für einen so genannten Typ-III-Sekretionsapparat verfügen: eine nadelförmige Struktur, die durch die Membran der Vakuole reicht und als Verbindung zum Zellplasma der Wirtszelle dient. Somit sind sie wohl in der Lage, eigene Proteine ins Zellplasma zu injizieren – darunter möglicherweise solche, welche die ▷

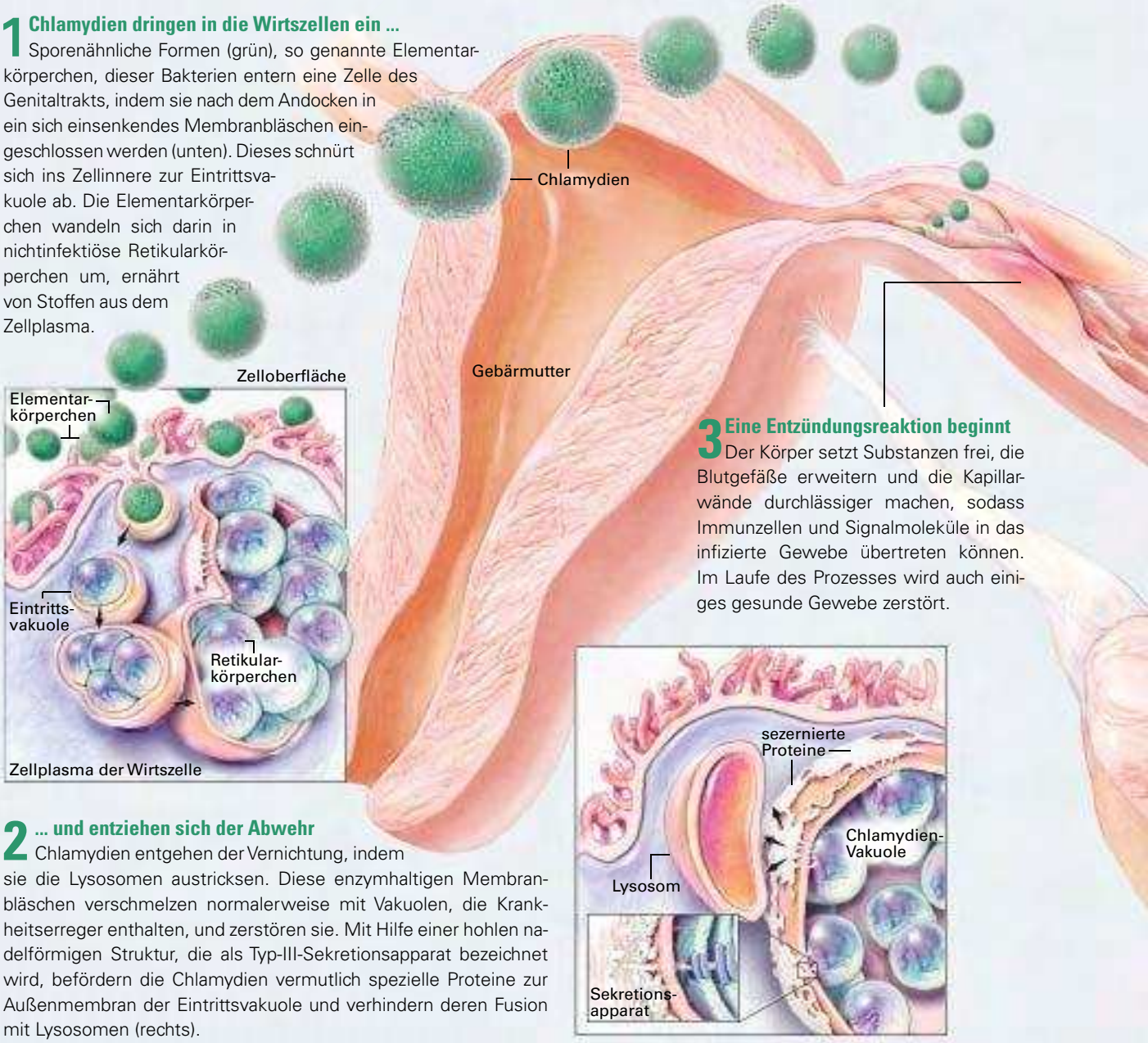
▷ Vakuolenmembran umgestalten helfen, um Lysosomen fernzuhalten.

Wie Experimente anderer Wissenschaftler mit fluoreszenzmarkierten Lipiden ergaben, werden diese Fettmoleküle aus bestimmten Abteilen der Wirtszelle, etwa dem Golgi-Apparat, in die Membran der Chlamydien-Herberge umdirigiert. Normalerweise enthält die Hülle der Eintrittsvakuole Moleküle der darin befindlichen Bakterien, was sie als fremd ausweist und ihren Inhalt der unmittelbaren Zerstörung durch Lysosomen preisgibt. Da die Chlamydien jedoch die Membran ihrer Vakuole mit Wirtslipiden tarnen, können die Lysosomen diese nicht von Wirtsorganellen unterscheiden und lassen sie unangetastet.

Wenn es gelingt, die eigens abgegebenen Chlamydien-Proteine zu identifizieren, die eine solche Membranmimikry zu Wege bringen, so sind zwei medikamentöse Ansätze denkbar, um dem Etablieren einer Infektion vorzubeugen.

Chlamydien – die unerkannte Invasion

Genitalinfektionen mit Chlamydien werden häufig erst entdeckt, wenn sie bereits irreversible Gesundheitsschäden verursacht haben. Im schlimmsten Fall kann der Eileiter durch die bakterielle Entzündung vernarben. Befruchtete Eizellen gelangen dann nicht mehr in die Gebärmutter, und es entsteht eine Eileiterschwangerschaft mit dem Risiko lebensbedrohlicher Blutungen. Neue Erkenntnisse zur Überlebensstrategie der Chlamydien (kleine Abbildungen) ermöglichen es vielleicht schon bald, der heimlichen Seuche einen Riegel vorzuschieben.



1 Chlamydien dringen in die Wirtszellen ein ...
Sporenähnliche Formen (grün), so genannte Elementarkörperchen, dieser Bakterien entern eine Zelle des Genitaltrakts, indem sie nach dem Andocken in ein sich einsenkendes Membranbläschen eingeschlossen werden (unten). Dieses schnürt sich ins Zellinnere zur Eintrittsvakuole ab. Die Elementarkörperchen wandeln sich darin in nichtinfektiöse Retikularkörperchen um, ernährt von Stoffen aus dem Zellplasma.

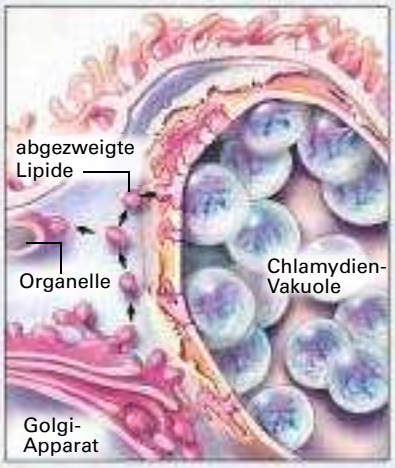
2 ... und entziehen sich der Abwehr
Chlamydien entgehen der Vernichtung, indem sie die Lysosomen austricksen. Diese enzymhaltigen Membranbläschen verschmelzen normalerweise mit Vakuolen, die Krankheitserreger enthalten, und zerstören sie. Mit Hilfe einer hohlen nadelförmigen Struktur, die als Typ-III-Sekretionsapparat bezeichnet wird, befördern die Chlamydien vermutlich spezielle Proteine zur Außenmembran der Eintrittsvakuole und verhindern deren Fusion mit Lysosomen (rechts).

3 Eine Entzündungsreaktion beginnt
Der Körper setzt Substanzen frei, die Blutgefäße erweitern und die Kapillarwände durchlässiger machen, sodass Immunzellen und Signalmoleküle in das infizierte Gewebe übertreten können. Im Laufe des Prozesses wird auch einiges gesunde Gewebe zerstört.

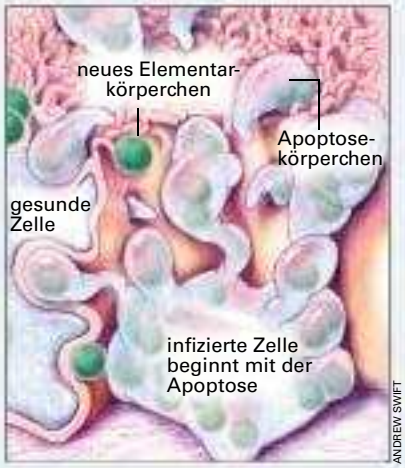
Zum einen könnten Hemmstoffe dieser Proteine die Fusion der Eintrittsvakuole mit Lysosomen erzwingen; dadurch käme es sofort nach dem Befall einer Zelle zu einer Immunattacke, weil bakterielle Bruchstücke an der Zelloberfläche präsentiert werden. Zum anderen sind Wirkstoffe denkbar, die irgendwie die Maschinerie des Lipidtransfers zur Vakuole stören und den Bakterien damit die Möglichkeit nehmen, sich vor den Lysosomen zu verbergen. Entsprechende Arzneistoffe könnten zum Beispiel als Bestandteil lokal anwendbarer Präparate eingesetzt werden, um sexuell übertragene Chlamydien-Infektionen zu vereiteln.

Einige der angesprochenen Proteine sowie weitere, die ebenfalls nur bei den Bakterien und nicht beim Menschen vorkommen, sind vielleicht auch als Impfstoffkomponenten von Nutzen. Dank nun sequenzierter Genome sollten sich geeignete Kandidaten jedenfalls leichter identifizieren lassen. ▷

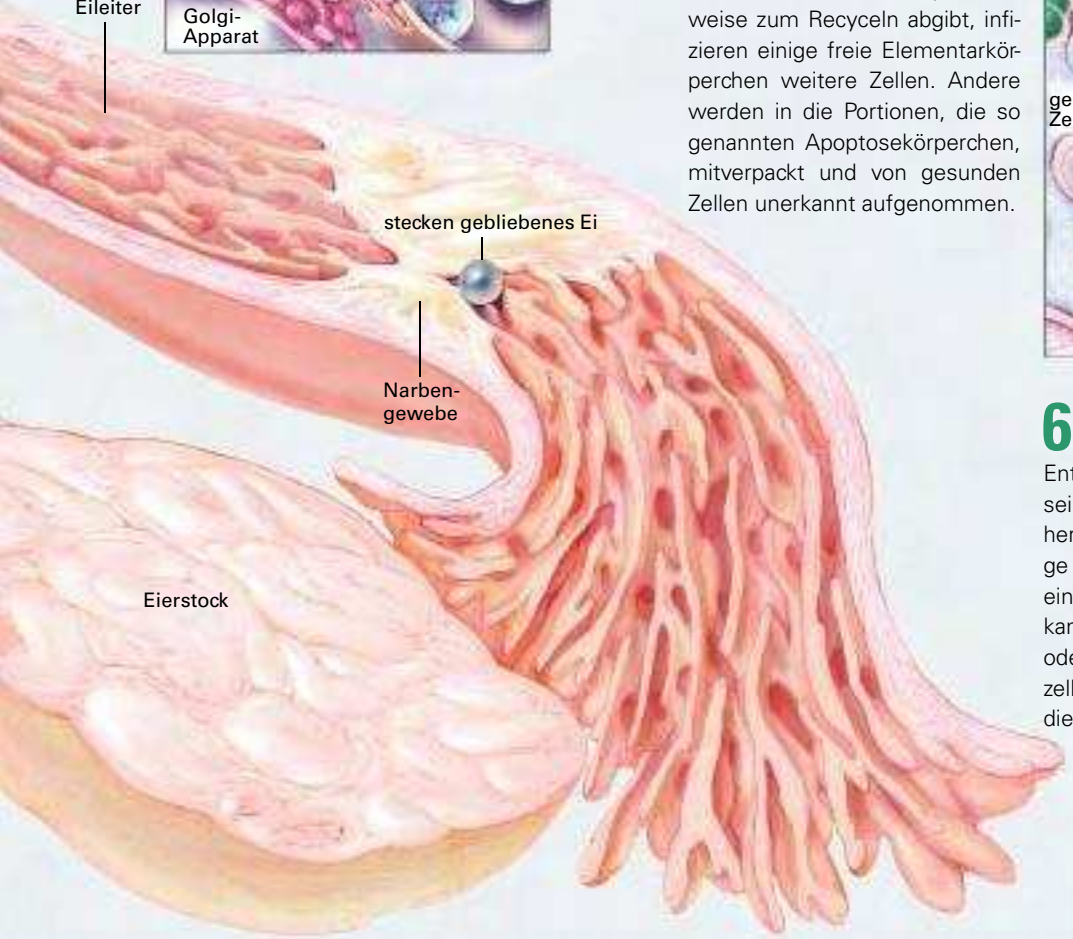
4 Die Bakterien bleiben unerkannt ...
Chlamydien verstecken sich zudem vor den Lysosomen, indem sie wirtseigene Lipide in die Membran ihrer Eintrittsvakuole umdirigieren (links). Diese Fettmoleküle stammen aus der zelleigenen Verteilerzentrale, dem Golgi-Apparat. Dadurch ist die Chlamydien-Vakuole praktisch nicht mehr von zelleigenen membranumhüllten Organellen zu unterscheiden.



5 ... und starten den Angriff auf weitere Zellen
Binnen 72 Stunden nach Erstbefall brechen neu gebildete Elementarkörperchen aus der Wirtszelle aus; vermutlich haben die Chlamydien zuvor das Selbstmordprogramm der Zelle, die Apoptose, aktiviert. Während die Zelle sich innerlich auflöst und ihr Material portionsweise zum Recyceln abgibt, infizieren einige freie Elementarkörperchen weitere Zellen. Andere werden in die Portionen, die so genannten Apoptosekörperchen, mitverpackt und von gesunden Zellen unerkannt aufgenommen.



ANDREW SWIFT



6 Narben verengen die Eileiter
Ist das Gewebe nach Abklingen der Entzündung so stark geschädigt, dass seine normale Struktur nicht wiederhergestellt werden kann, wandern junge Bindegewebszellen (Fibroblasten) ein und bilden Narbengewebe. Dies kann schließlich den Eileiter verengen oder sogar verschließen, sodass die Eizellen auf dem Weg vom Eierstock in die Gebärmutter stecken bleiben.

▷ Weitere Möglichkeiten eröffnen sich durch neuere Erkenntnisse über die Rolle von T-Zellen. Die »Killer« unter ihnen erledigen infizierte Zellen normalerweise, indem sie dort ein Selbstmordprogramm, die Apoptose, auslösen. Im Prinzip begehen die betroffenen Zellen Harakiri, aber ohne eine Leiche zu hinterlassen. Sie spalten enzymatisch ihre DNA und ihre Proteine und zerlegen sich dann selbst in kleine Portionen Material, das rückstandslos von der Nachbarschaft aufgenommen und wiederverwertet wird. Immunzellen, darunter T-Zellen und Makrophagen, regen zudem die Produktion von Cytokinen an, die auch entzündliche Reaktionen hervorrufen, um die Ausbreitung der Bakterien zu verhindern. Ein solcher Signalstoff ist der Tumornekrosefaktor-alpha (TNF-alpha). Wie Laborexperimente gezeigt haben, überleben aber einige infizierte Zellen trotz Behandlung mit ihm und anderen Cytokinen, die eine Apoptose induzieren. Offenbar unterbinden die Erreger irgendwie den Untergang und die Infektion persistiert. Die körpereigene Abwehr gibt sich allerdings nicht so schnell geschlagen. Um die Erreger wenigstens in Schach zu halten, werden weiterhin Cytokine ausgeschüttet, welche die Entzündung chronisch aufrechterhalten.

Nun dürfen aber selbst nur chronisch infizierte Zellen nicht ewig leben. Sie müssen zerfallen, bevor die vermehrten Chlamydien weitere Zellen befallen können. In der Tat haben die Bakterien eigene Mechanismen entwickelt, um zu einem für sie günstigen Zeitpunkt die kontrollierte Apoptose ihrer Wirtszelle auszulösen. Wie zudem Jean-Luc Perfettini während seiner Promotionsarbeit bei einem von uns (Ojcius) am Pasteur-Institut in Paris entdeckte, entweichen Chlamydien aus der von ihnen getöteten Zelle auf raffinierte Weise, die ihr Risiko minimiert, das Immunsystem auf sich aufmerksam zu machen. Dadurch kann sich die Infektion im Körper praktisch unentdeckt ausbreiten.

Noch bedarf es genauerer Untersuchungen der Proteine, mit denen die Bakterien in der letzten Phase ihres Lebenszyklus die Apoptose der Wirtszelle auslösen – beziehungsweise zuvor gegen solche Signale (man denke etwa an TNF-alpha) schützen. Bisherige biologische Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die letztere Funktion der bessere Angriffspunkt für die Entwicklung eines Impfstoffs darstellt. Ließen sich die permanent infizierten Zellen für eine Apoptose-Induktion sensibilisieren, könnten damit vielleicht jene Chlamydien, die über lange Zeit versteckt ruhen, eliminiert und die Komplikationen chronischer Infektionen verhindert werden.

Problem Impfstoff

Selbst mit weiteren Erkenntnissen wird die Entwicklung eines idealen Impfstoffs nicht einfach sein. Er müsste einerseits die Antikörperbildung wie auch die zelluläre Immunantwort effektiver als eine natürliche Infektion stimulieren und andererseits die Entzündungsreaktion irgendwie in Grenzen halten. Im Fall der sexuell übertragenen Chlamydien-Infektionen wäre zudem sicherzustellen, dass

Sind Chlamydien-Infektionen mit schuld an Herz-Kreislauf-Erkrankungen?

Bronchitis und Lungenentzündung sind möglicherweise nicht die einzigen unangenehmen Folgen einer Infektion der Atemwege mit *Chlamydia pneumoniae*. In neuerer Zeit ist diese Spezies in Verdacht geraten, vielleicht zu Schlaganfällen und Herzinfarkten beizutragen. Hauptursache hierfür ist eine Arteriosklerose: eine Verengung von Arterien – unter anderem der Herzkranzgefäße – durch verdickte Stellen der Gefäßwand. Auf ihr Konto geht letztlich rund die Hälfte aller Todesfälle unter Erwachsenen in westlichen Industrieländern. Wiederum die Hälfte davon lässt sich durch klassische Risikofaktoren wie einen erhöhten Cholesterinspiegel und das Rauchen erklären. Auf der Suche nach den Ursachen für die zweiten fünfzig Prozent zogen Wissenschaftler schließlich auch Infektionen in Betracht, und zwar als sich herausstellte, dass Entzündungsprozesse – eine allgemeine Abwehrreaktion gegen erkannte Eindringlinge – das Wachstum und das gefährliche Aufreißen der lipidhaltigen Ablagerungen in den Herzkranzgefäßen begünstigen.

Chlamydia pneumoniae wurde schon kurz nach Identifikation als eigene Chlamydien-Spezies 1983 zur Hauptverdächtigen, da die Art so weit verbreitet ist. Etwa sechzig Prozent der Erwachsenen besitzen Antikörper gegen den Erreger, ein Zeichen für eine zurückliegende oder bestehende Infektion. Der Verdacht erhärtete sich, als finnische Wissenschaftler 1988 über ein statistisch erhöhtes Risiko für Koronarerkrankungen beim Vorhandensein von Chlamydien-Antikörpern berichteten. Fünf Jahre später konnten andere Forscher das Bakterium in verengten Arterien nachweisen.

Etwa seit der Jahrtausendwende kamen aus tierexperimentellen Studien einige der überzeugendsten Hinweise auf einen Zusammenhang. So zeigte sich, dass Chlamydien aus der Lunge von Mäusen in andere Regionen des Körpers wandern können, versteckt im Innern von entzündungsfördernden weißen Blutkörperchen. Ferner zeigte sich bei Mäusen und Kaninchen, dass Infektionen mit *C. pneumoniae* eine Arteriosklerose beschleunigen und Antibiotika diesen Effekt verhindern können.

Eine Studie an 272 Patienten wies bei 54 Prozent das Bakterium *Chlamydia pneumoniae* in arteriosklerotisch verengten Herzkranzgefäßen nach. Der Pfeil zeigt auf eine Ansammlung.

Solche vorläufigen Befunde gaben den Anstoß zu einer Reihe kleinerer klinischer Studien beim Menschen. Fünf davon fanden eine statistisch signifikante Verlangsamung der Arteriosklerose durch eine ein- bis dreimonatige Antibiotikatherapie. Was allerdings schwer wiegende Herz-Kreislauf-Komplikationen anbelangt, war das Ergebnis gemischt. Die Hoffnung, eine längerfristige Behandlung könnte mehr bewirken, wurde jedoch enttäuscht: durch zwei 2004 abgeschlossene größere Studien, in denen jeweils 4000 Teilnehmer für ein bis zwei Jahre Antibiotika einnahmen.

Ob tatsächlich ein kausaler Zusammenhang zwischen einer Infektion mit *C. pneumoniae* und Arteriosklerose besteht, lässt sich vermutlich nur schwer belegen, da so viele andere Faktoren letztlich bei einer Koronarerkrankung und ihren Folgen mitspielen.

Unterbrechung der Infektionskette

Sexualerziehung und Hygiene allein reichen nicht aus, um die Ausbreitung von Chlamydien-Infektionen zu verhindern. Deshalb suchen viele Wissenschaftler nach Impfstoffen oder prophylaktisch wirksamen Substanzen. Einige der viel versprechenden neuen Ansatzpunkte gegen Chlamydien sind hier aufgelistet. Es geht vor allem darum, die Überlebensstrategien der Bakterien zu durchkreuzen oder die überschießende Entzündungsreaktion zu zügeln.

Bakterien beim Eintritt in den Körper vernichten

Entwicklung lokal anwendbarer Mikrobizide, die als Gel oder Schaum in die Scheide oder den After eingebracht werden. Erprobt werden solche Präparate bereits zur Prävention von Infektionen mit dem Aidserreger.

Eindringen in Wirtszellen vorbeugen

Entwicklung eines Impfstoffs, der die Produktion von Antikörpern gegen Chlamydien verstärkt. Die Gabe entzündungshemmender Substanzen nach Verabreichung eines Impfstoffs oder Antibiotikums sollte theoretisch die Gewebeschäden reduzieren. Dies war jedoch in Tierexperimenten bisher nicht zu belegen.

Vermehrung in Zellen hemmen

Entwicklung von Substanzen, die Chlamydien daran hindern, Lipide und andere Stoffe der Wirtszelle für ihre Zwecke zu nutzen. Die dafür verwendeten Proteine des Bakteriums sind allerdings noch nicht identifiziert.

Chlamydien in den Zellen zerstören

Entwicklung von Wirkstoffen zur Inaktivierung des Typ-III-Sekretionsapparats, der vermutlich Chlamydien-Proteine zur Abwehr von Lysosomen ausschleust. Andere Bakterien, deren fast identischer Sekretionsapparat durch Mutation inaktiviert wurde, riefen im Experiment keine Symptome mehr hervor.

Ausbreitung im Körper stoppen

Induktion des Selbstmordprogramms infizierter Zellen, bevor die eingenisteten Bakterien sich vermehren und wieder in die infektiöse Form verwandeln, die weitere Zellen befällt. Substanzen, die bei Tumorzellen den Selbstmord, die Apoptose, anregen, werden derzeit entwickelt. Theoretisch könnten sie auch bei Chlamydien-Infektionen wirksam sein.

Gedächtniszellen langfristig im Genitaltrakt verbleiben, um jederzeit auf einen neuerlichen Befall reagieren zu können. Leider werden dort keine Gedächtniszellen gebildet und sie verlassen gewöhnlich diese Region nach einer Infektion so rasch, dass die Immunität nur von kurzer Dauer ist.

Bei Frauen sind hauptsächlich die langfristigen Komplikationen der Infektion problematisch. Sie davor zu schützen dürfte einfacher sein, als die Ansteckung selbst zu verhindern. Erreichbar erscheint dies, indem man beide Geschlechter impft. Das Vakzin müsste die Antikörperproduktion bei Männern nur so weit ankurbeln, dass deren Bakterienlast sich reduziert und somit weniger Chlamydien beim Geschlechtsakt übertragen werden. Dann würde bei einer immunisierten Frau die Zahl der Gedächtniszellen, die nach einem solchen Akt zum Genitaltrakt eilen, ausreichen, die relativ geringe Menge Chlamydien zu eliminieren, bevor sie in die Eileiter vordringen können.

Solange es einen solchen Impfstoff nicht gibt, ist zu erwägen, lokalen Kontrazeptiva Substanzen gegen Chlamydien beizumischen. Denkbar sind Hemmstoffe gegen Proteine, mit denen die Chlamydien an Schleimhautzellen im Genitaltrakt andocken, oder aber gegen die abgegebenen Eiweißstoffe, die den Bakterien das Überleben in der Wirtszelle ermöglichen. Zur Trachom-Bekämpfung allerdings dürfte nur eine Impfung nützen, die eine Infektion des Auges vollständig unterbindet.

Wenn auch effektive medizinische Möglichkeiten der Vorbeugung noch ausstehen, so gibt es doch bereits sehr erfolgreiche Medikamente gegen Chlamydien: Antibiotika. Leider hat nicht jeder Zugang dazu. Ihre Wirksamkeit dürfte uns erhalten bleiben – darauf lassen aktuelle Erkenntnisse aus der Genomanalyse schließen. Krank machende Bakterien, die außerhalb von Zellen leben, können einen regen Genaustausch mit anderen unterhalten. Dagegen sind die Genome von Chlamydien seit Jahrmillionen weit gehend unverändert geblieben. Das zeigt, dass sie neue Gene, darunter solche für Antibiotika-Resistenzen, nicht ohne Weiteres von anderen Bakterien in ihr Erbgut aufnehmen können.

Eine Therapie kann jedoch die Folgen der Entzündungsreaktionen nicht rückgängig machen. Daher müssen Antibiotika möglichst frühzeitig gegeben werden. Hier könnten Vorsorgeuntersuchungen bei stark gefährdeten Personen hilfreich sein. Urintests bei jungen Menschen zum Beispiel in Schulen, Musterungsstellen des Militärs oder Jugendstrafanstalten haben sich in Pilotstudien als Erfolg versprechende Maßnahme erwiesen. Neben der Suche nach wirksamen Impfstoffen sollten die Gesundheitsbehörden daher zur Eindämmung der Chlamydiose verstärkt auf solche Programme setzen. ◁

David M. Ojcius kam 2004 an die Universität von Kalifornien in Merced, nachdem er zwölf Jahre an französischen Instituten zelluläre und immunologische Aspekte von Infektionskrankheiten untersucht hatte. **Toni Darville**, Kinderärztin mit dem Spezialgebiet Infektiologie an der Medizinischen Hochschule von Arkansas, erforscht seit 1994 die Immunologie von Chlamydien-Infektionen an Tiermodellen. **Patrik M. Bavoil**, Professor an der Universität von Maryland, arbeitet an biochemischen und molekularbiologischen Aspekten der Chlamydiosen.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Involvement of Chlamydia pneumoniae in atherosclerosis: more evidence for lack of evidence. M. M. Ieven und V. Y. Hoymans in: Journal Clinical Microbiology, Bd. 43, Heft 1, S.19, 2005

Chlamydia and apoptosis: life and death decisions of an intracellular pathogen. Von Gerald I. Byrne and David M. Ojcius in: Nature Reviews Microbiology, Bd. 2, Heft 10, S. 802, Oktober 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Das Geheimnis

Physiker sind auf der Jagd nach einem Teilchen, das die Existenz eines neuartigen, allgegenwärtigen Felds beweisen soll. Die Entdeckung dieses Higgs-Felds würde Grundfragen über den Aufbau des Universums beantworten.

Von Gordon Kane

Wer behauptet, er wüsste, was Masse ist, ahnt gar nicht, welche Probleme sich hinter dem Begriff verbergen. Zweifellos ist ein Elefant voluminöser und gewichtiger als eine Ameise. Selbst in der Schwerelosigkeit hätte er eine größere Masse – er ließe sich nur mit Mühe anschieben und in Bewegung setzen. Das liegt natürlich daran, dass der Elefant aus viel mehr Atomen besteht als die Ameise. Aber woher stammt die Masse des einzelnen Atoms? Und wie kommt es zu den Massen der Elementarteilchen, aus denen die Atome bestehen? Warum haben sie überhaupt Masse?

Das Problem hat zwei voneinander unabhängige Aspekte. Zum einen müssen wir herausfinden, wodurch Masse überhaupt entsteht. Wie sich gleich herausstellen wird, ist sie das Ergebnis von mindestens drei verschiedenen Mechanismen. Die Hauptrolle in den einschlägigen Hypothesen der Physiker spielt ein neues, alles durchdringendes Feld. Die Massen der Elementarteilchen sollen durch Wechselwirkung mit diesem so genannten Higgs-Feld zu Stande kommen. Falls das Feld existiert, muss der Theorie gemäß auch ein zugehöriges Teilchen existieren – das Higgs-Boson, nach dem Forscher derzeit mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern fahnden.

Der zweite Aspekt betrifft die Frage, warum die verschiedenen Teilchenarten just diese speziellen Massen tragen und keine anderen. Die Partikelmassen erstrecken sich über mindestens elf Größenordnungen, aber den Grund dafür kennen wir noch nicht (siehe Diagramm S. 42). Zum Vergleich: Auch ein Elefant und die kleinste Ameise unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Masse um etwa elf Größenordnungen.

Was bedeutet *m* eigentlich?

Die erste wissenschaftliche Definition von Masse lieferte Isaac Newton 1687 in seinem bahnbrechenden Werk »Principia mathematica«: »Die Größe der Materie wird durch ihre Dichtigkeit und ihr Volumen vereint gemessen.« Mehr als 200 Jahre lang erfüllte diese sehr einfache Definition ihren Zweck, denn nach dem Verständnis von Newton und seinen Nachfolgern soll die Wissenschaft erst einmal beschreiben, wie sich die Dinge verhalten, bevor sie zu erklären versucht, warum das so ist. Doch in den vergangenen Jahren wurde die Erklärung – das Warum – der Masse zum Gegenstand physikalischer Forschungen. Ein Erfolg würde das Standardmodell der Teilchenphysik – die etablierte Theorie der bekannten Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen – vervollständigen und erweitern. Außerdem würden Rätsel gelöst wie das der Dunklen Materie, die rund 25 Prozent des Universums ausmacht.

Unser modernes Verständnis von Masse ist viel diffiziler als Newtons Definition und beruht auf dem Standardmodell. Zentraler Bestandteil dieses Modells ist eine mathematische Funktion, die darstellt, wie die verschiedenen Teilchen miteinander wechselwirken. Aus dieser Lagrange-Funktion, benannt nach dem mathematischen Physiker Joseph Louis de Lagrange (1736–1813), lässt sich nach den Regeln der relativistischen Quantentheorie das Verhalten der fundamentalen Teilchen berechnen – zum Beispiel, wie sie sich zu einem zusammengesetzten Teilchen wie dem Proton vereinen. Sowohl für fundamentale wie für zusammengesetzte Teilchen können wir dann berechnen, wie sie auf Kräfte reagieren. Dabei gilt Newtons Gleichung $K = m\,b$, in der die wirkende Kraft K, die Masse m und die resultierende Beschleunigung b zueinander in Beziehung gesetzt werden. Die Lagrange-Funktion gibt an, was wir für m einsetzen müssen – und das ist mit Masse des Teilchens gemeint.

Aber der Begriff, wie wir ihn gewöhnlich verstehen, taucht nicht nur in der Formel $K = m\,b$ auf. Gemäß Einsteins Spezieller Relativitätstheorie bewegen sich masselose Teilchen im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit, Teilchen mit Masse hingegen langsamer, und zwar in einer Weise, die aus ihrer Masse folgt. Die Gravitation wirkt auf Masse und Energie gleichermaßen. Die aus der Lagrange-Funktion für jedes Teilchen abgeleitete Größe m verhält sich in all diesen Fällen genau so, wie wir es für eine gegebene Masse erwarten.

Jedes fundamentale Teilchen hat eine charakteristische Masse, die so genannte Ruhemasse; Teilchen mit Ruhemasse null werden als masselos bezeichnet. Für ein zusammengesetztes Teilchen ergibt sich seine Masse aus der Ruhemasse seiner Bestandteile, ihrer kinetischen Ener- ▷

LINKS OBEN: CORBIS; ZEFA; RECHTS: SKY &TELESCOPE / CASEY B. REED

der Masse

Das großräumige Geschehen im Universum wird von der Schwerkraft bestimmt, das heißt von den Massen der verschiedenen Teilchen im All. Warum die Teilchenmassen gerade diese oder jene Größe haben und so verschieden sind, bleibt ein Rätsel.

▷ gie sowie der potenziellen Energie ihrer Wechselwirkungen. Dabei sind Energie und Masse gemäß Einsteins berühmter Gleichung $E=mc^2$ miteinander verknüpft: Energie ist gleich Masse mal Quadrat der Lichtgeschwindigkeit.

Ein Beispiel für den Energiebeitrag zur Masse ist die häufigste Art von Materie im Universum: die Protonen und Neutronen, aus denen die Atomkerne von Sternen, Planeten und Menschen bestehen. Diese Teilchen machen etwa 4 bis 5 Prozent der Masse des Universums aus (siehe Kasten S. 40). Nach dem Standardmodell bestehen Protonen und Neutronen aus noch fundamentaleren Partikeln, den Quarks, die durch masselose Austauschteilchen namens Gluonen miteinander verbunden sind. Trotz der im Proton umherwirbelnden Quarks und Gluonen sehen wir es von außen als einheitliches Gebilde mit einer charakteristischen Masse, die sich aus den Massen und Energien seiner Bestandteile zusammensetzt.

Mit Hilfe des Standardmodells können wir ausrechnen, dass fast die gesamte Masse der Protonen und Neutronen von der kinetischen Energie der Quarks und Gluonen in ihrem Innern herrührt; den kleinen Rest liefert die Ruhemasse der Quarks. Somit stammen ungefähr 4 bis 5 Prozent der Masse des gesamten Universums – fast die gesamte vertraute Materie um uns herum – aus der Bewegungsenergie der in den Protonen und Neutronen enthaltenen Quarks und Gluonen.

Im Gegensatz zu Protonen und Neutronen bestehen die wirklich fundamentalen Teilchen wie Quarks und Elektronen nicht aus noch kleineren Bausteinen. Mit der Frage, wie sie ihre Ruhemasse erwerben, kommen wir dem Problem des Massenursprungs auf den Grund. Wie schon erwähnt versucht die heutige theoretische Physik die Masse der fundamentalen Teilchen durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld zu erklären. Aber warum wirkt das Higgs-Feld im gesamten Universum? Warum ist seine Stärke im kosmischen Maßstab nicht praktisch null wie beim elektromagnetischen Feld? Was ist das überhaupt für ein Feld?

Mit der Frage, wie Quarks und Elektronen ihre Ruhemasse erwerben, kommen wir dem Problem des Massenursprungs auf den Grund

Das Higgs-Feld ist ein Quantenfeld. Das klingt geheimnisvoll, doch tatsächlich gehören alle fundamentalen Teilchen zu einem bestimmten Quantenfeld. Auch das elektromagnetische Feld ist darin keine Ausnahme; sein Teilchen ist das Lichtquant oder Photon. So gesehen ist das Higgs-Feld nicht rätselhafter als Licht. Allerdings unterscheidet es sich in drei entscheidenden Punkten von allen anderen Quantenfeldern.

Der erste Unterschied ist eher technischer Art. Alle Felder besitzen eine Eigenschaft namens Spin, einen Eigendrehimpuls der zugehörigen Quantenteilchen. Elektronen haben Spin 1/2, die meisten mit einer Kraft verknüpften Teilchen wie das Photon hingegen Spin 1. Die Gravitonen, die Trägerteilchen der Schwerkraft, haben Spin 2. Das dem Higgs-Feld zugeordnete Teilchen trägt Spin 0. Dieses Higgs-Boson erscheint auf Grund seines verschwindenden Spins in der Lagrange-Funktion anders als die übrigen Teilchen.

Die zweite Besonderheit des Higgs-Felds erklärt, warum es im gesamten Universum von null verschieden ist. Jedes System – auch das Universum – strebt nach seinem niedrigsten Energiezustand, wie ein Ball, der in eine Talsohle rollt. Bei üblichen Feldern – ob beim Elektromagnetismus, dem wir Rundfunk und Fernsehen verdanken, oder bei der Gravitation, die für unsere Bodenhaftung sorgt – ist der niedrigste Energiezustand derjenige, bei dem das Feld den Wert null annimmt. Wird dem System ein von null verschiedenes Feld hinzugefügt, so erhöht sich dadurch die Gesamtenergie des Systems.

Beim Higgs-Feld hingegen sinkt die Energie des Universums, wenn das Feld einen von null verschiedenen konstanten Wert hat. Um beim Vergleich mit dem Ball im Tal zu bleiben: Bei gewöhnlichen Feldern liegt die Talsohle dort, wo das Feld verschwindet. Doch im Fall des Higgs-Felds erhebt sich in der Mitte des Tals – dort, wo das Feld null wird – ein kleiner Hügel, und die Talsohle bildet einen Kreis um diesen Hügel (siehe Kasten rechts). Der Ball, der das Universum repräsentiert, kommt deshalb nicht in der Talmitte, sondern irgendwo in diesem kreisförmigen Graben zur Ruhe – bei einem von null verschiedenen Wert des Felds. Das heißt, das Universum ist in seinem Grundzustand von einem Higgs-Feld erfüllt, das nirgends verschwindet.

Die letzte Eigenart des Higgs-Felds ist seine Wechselwirkung mit anderen Teilchen: Sie verhalten sich, als hätten sie eine Masse, die proportional zur Stärke des Felds mal Stärke der Wechselwirkung ist. Die Massen ergeben sich aus den Ausdrücken in der Lagrange-Funktion, die für die Wechselwirkung der Teilchen mit dem Higgs-Feld stehen.

Allerdings verstehen wir all dies noch nicht ganz; wir wissen nicht einmal, wie viele Arten von Higgs-Feldern es eigentlich gibt. Zwar erfordert das Standardmodell nur ein Higgs, um die Massen aller Elementarteilchen zu erzeugen, doch die Physiker wissen, dass das Standardmodell von einer umfassenderen Theorie abgelöst werden muss. Als Favoriten gelten Supersymmetrische Standardmodelle, kurz SSM. Dabei bekommt jedes Teil- ▷

IN KÜRZE

▶ **Masse** ist eine scheinbar alltägliche Eigenschaft der Materie, aber sie stellt die Wissenschaftler vor grundlegende Fragen. Wie erwerben die Elementarteilchen überhaupt Masse? Warum haben die Teilchenmassen just die Werte, die wir beobachten?

▶ Um diese Fragen zu beantworten, müssen die Theoretiker das **Standardmodell der Teilchenphysik** erweitern. Vielleicht löst sich dabei das Rätsel der unsichtbaren Dunklen Materie, die rund 25 Prozent des Kosmos ausmacht.

▶ Der Theorie zufolge gewinnen die Elementarteilchen ihre Masse durch Wechselwirkung mit einem allgegenwärtigen Quantenfeld. Indizien für dieses so genannte **Higgs-Feld** sollen aufwändige Experimente an Teilchenbeschleunigern liefern.

Wie das Higgs-Feld Masse erzeugt

Der vom Higgs-Feld erfüllte »leere« Raum wird hier mit einem Strand voll spielender Kinder verglichen.

Ein Teilchen, das den Raum durchquert, gleicht einem Eisverkäufer, der auf dem Strand erscheint und ...

... sofort zahlreiche Kinder anlockt, die sich um den Eiswagen drängen und sein Fortkommen behindern – er erwirbt »Masse«.

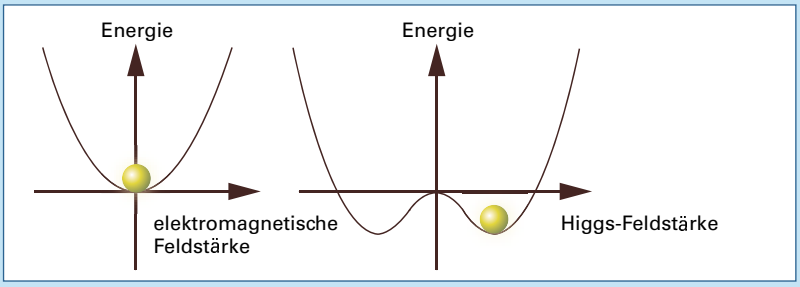
EMILY HARRISON, NACH: DAVID MILLER, UNIVERSITY COLLEGE LONDON

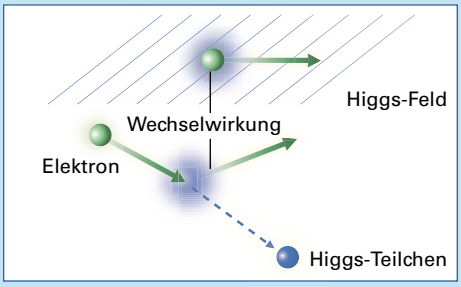
Überall von null verschieden

Ein typisches Feld wie das elektromagnetische hat seine niedrigste Energie bei Feldstärke null (links). Das Universum verhält sich wie ein rollender Ball, der am tiefsten Punkt des Tals zur Ruhe kommt – in diesem Fall dort, wo die Feldstärke verschwindet. Das Higgs-Feld hingegen erreicht seine minimale Energie bei einer von null verschiedenen Feldstärke – der »Ball« ruht bei einem nicht verschwindenden Wert (rechts). Darum wird das Universum in seinem natürlichen Grundzustand von einem überall vorhandenen Higgs-Feld erfüllt.

Zweierlei Phänomene

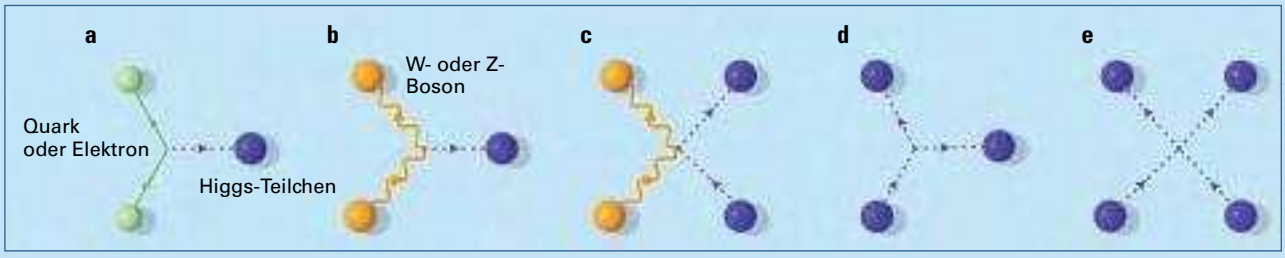
Ein und dieselbe Wechselwirkung verursacht zwei völlig unterschiedliche Phänomene: Zum einen verleiht sie den Teilchen ihre Masse (oben), zum anderen erzeugt sie ein Higgs-Boson (unten). Dieser Umstand wird sich bei der experimentellen Überprüfung der Higgs-Theorie als sehr nützlich erweisen.





Wechselwirkung mit anderen Teilchen

So genannte Feynman-Diagramme geben wieder, wie das Higgs-Teilchen mit anderen Elementarteilchen wechselwirkt. Diagramm a zeigt ein Teilchen, etwa ein Quark oder ein Elektron, das ein Higgs-Teilchen emittiert. Diagramm b stellt den entsprechenden Prozess für ein W- oder Z-Boson dar. Ein W- oder Z-Boson kann auch mit zwei Higgs-Teilchen gleichzeitig reagieren (siehe c); dieses Diagramm lässt sich auch als Streuung eines Higgs-Teilchens am W- oder Z-Boson interpretieren. Wechselwirkungen vom Typ a, b und c erzeugen die Teilchenmassen. Das Higgs reagiert außerdem mit sich selbst, wie in den Diagrammen d und e dargestellt. Kompliziertere Prozesse lassen sich durch Kombinationen dieser elementaren Diagramme wiedergeben. Die Wechselwirkungen d und e sind für die Form der Energiekurve (siehe Zeichnung oben links) verantwortlich.



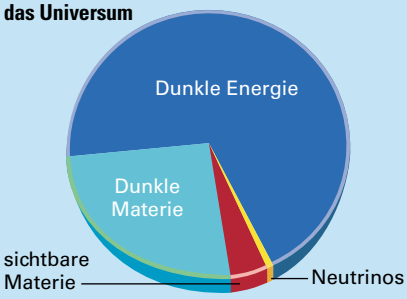
GRAFIKEN: BRYAN CHRISTIE DESIGN

Eine kosmische Bestandsaufnahme

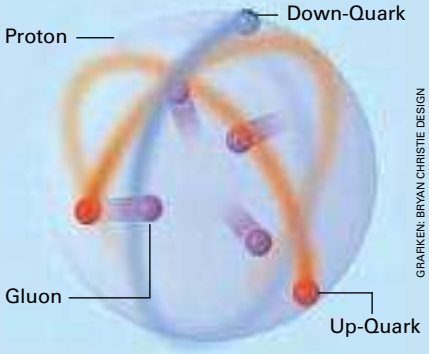
Die Theorie des Higgs-Felds erklärt, wie Elementarteilchen ihre Masse erhalten. Doch der Higgs-Mechanismus ist nicht der einzige Ursprung der Massenenergie im Universum; dieser Begriff umfasst Masse und Energie, da beide durch Einsteins Formel $E = mc^2$ zusammenhängen.

Rund 70 Prozent der Massenenergie des Universums macht die so genannte Dunkle Energie aus, die nicht direkt mit Teilchen zusammenhängt. Das wichtigste Indiz für ihre Existenz ist die Tatsache, dass sich die Expansion des Universums beschleunigt. Was sich hinter der Dunklen Energie verbirgt, ist eines der größten Probleme der Physik (siehe »Ein Universum voll dunkler Rätsel« von Gerhard Börner, Spektrum der Wissenschaft 12/2003, S. 28).

Die übrigen 30 Prozent der kosmischen Massenenergie stammen von Materie, das heißt von Teilchen mit Masse. Die uns vertraute Materie – Sterne, Planeten, Menschen – besteht aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Sie ergeben etwa ein Sechstel der Materie des Universums, beziehungsweise 4 bis 5 Prozent der gesamten Massenenergie. Der größte Teil davon stammt von der Bewegungsenergie der Quarks und Gluonen, die in den Protonen und Neutronen umherwirbeln.



Die Massenenergie des Universums kommt in vier Grundtypen vor. Die geheimnisvolle Dunkle Energie ist dafür verantwortlich, dass sich die Expansion des Universums beschleunigt. Die unsichtbare Dunkle Materie macht sich nur durch die Wirkung ihrer Gravitation bemerkbar. Schließlich gibt es die gewohnte sichtbare Materie und die flüchtigen Neutrinos.



Die sichtbare Materie besteht größtenteils aus Protonen und Neutronen, in denen Quarks und Gluonen umherschwirren. Deren Bewegungsenergie macht fast die gesamte Masse des Protons und des Neutrons aus.

Einen kleineren Beitrag zur kosmischen Materie leisten Teilchen namens Neutrinos, die in drei Varianten vorkommen. Sie tragen winzige Massen, von denen nur Obergrenzen bekannt sind; demnach machen sie weniger als ein halbes Prozent des Universums aus.

Fast alles Übrige – rund 25 Prozent der kosmischen Massenenergie – ist unsichtbare Dunkle Materie. Auf ihre Existenz schließen wir aus der Wirkung ihrer Gravitation auf sichtbare Himmelsobjekte. Worum es sich wirklich handelt, wissen wir noch nicht (siehe »Die Suche nach Dunkler Materie« von David B. Cline, Spektrum der Wissenschaft 10/2003, S. 44). Diese rätselhafte Materieform muss aus massereichen Teilchen bestehen, da sie unter dem Einfluss der Gravitation Klumpen von der Größe ganzer Galaxien bildet. Aus vielerlei Gründen kann die Dunkle Materie aus keinem Teilchen des normalen Standardmodells bestehen.

Der aussichtsreichste Kandidat für die Dunkle Materie ist der – in Erweiterungen des Standardmodells, in so genannten Supersymmetrischen Standardmodellen, auftretende – »leichteste Superpartner« (LSP). Die Masse des LSP liegt vermutlich bei 100 Protonenmassen. Dass der LSP ein guter Kandidat ist, erkannten die Theoretiker, bevor die Kosmologen wussten, dass nur eine völlig neue Art von Materie die Dunkle Materie zu erklären vermag.

▷ chen des Standardmodells einen – noch unentdeckten – Superpartner mit eng verwandten Eigenschaften (siehe »Neue Physik jenseits des Standardmodells« von Gordon Kane, Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 26). Für das Supersymmetrische Standardmodell braucht man mindestens zwei verschiedene Higgs-Felder. Die Wechselwirkung mit diesen beiden Feldern verleiht den Standardmodell-Teilchen ihre Masse komplett, den Superpartnern hingegen nur zum Teil. Mit den beiden Higgs-Feldern gehen fünf Arten von Higgs-Bosonen einher: drei elektrisch neutrale und zwei geladene. Die winzigen Massen der Neutrinos könnten eher indirekt aus diesen Wechselwirkungen hervorgehen – oder aus einer dritten Art von Higgs-Feld.

Die Theoretiker favorisieren die Kombination von SSM und Higgs-Wechselwirkung aus mehreren Gründen. Erstens wären ohne Higgs-Mechanismus die W- und Z-Bosonen, die Träger der schwachen Kraft, masselos wie das mit ihnen verwandte Photon, und die schwache Wechselwirkung wäre so stark wie die elektromagnetische. Der Theorie zufolge stattet der Higgs-Mechanismus die W- und Z-Bosonen auf sehr spezielle Weise mit Masse aus. Entsprechende Vorhersagen – beispielsweise über das Verhältnis von W- und Z-Masse – haben sich experimentell bestätigt.

Rätselhaftes Energietal

Zweitens wurden praktisch alle anderen Aspekte des Standardmodells immer wieder erhärtet, und in einer derart detaillierten und zusammenhängenden Theorie lässt sich ein Bestandteil wie das Higgs nur schwer verändern, ohne den Rest zu beeinflussen. Zum Beispiel führte die Analyse von präzisen Messungen an W- und Z-Bosonen zur richtigen Vorhersage der Masse des Top-Quarks, noch bevor es direkt erzeugt werden konnte. Änderungen am Higgs-Mechanismus würden diese erfolgreiche Vorhersage verderben.

Drittens stattet der Higgs-Mechanismus sämtliche Teilchen des Standardmodells mit Masse aus – die W- und Z-Bosonen ebenso wie Quarks und Leptonen. Die Alternativvorschläge können das nicht. Zudem liefert nur das SSM einen Rahmen für die Vereinheitlichung der Naturkräfte. Und schließlich vermag das SSM zu erklären, warum das »Energietal« des Universums die für den Higgs-Mechanismus nötige Form hat. Im einfa-

chen Standardmodell muss die Form des Tals eigens postuliert werden, während sie sich im SSM mathematisch ergibt.

Natürlich möchten Physiker die Idee des Higgs-Mechanismus durch direkte Tests überprüfen. Dafür bieten sich drei Möglichkeiten an. Erstens können wir nach den Higgs-Bosonen suchen. Diese charakteristischen Teilchen müssen existieren, sonst stimmt die ganze Erklärung nicht. Derzeit fahnden Physiker am Tevatron-Collider des Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia (US-Bundesstaat Illinois) nach Higgs-Bosonen.

Zweitens können wir, wenn die Higgs-Bosonen erst einmal nachgewiesen sind, beobachten, wie sie mit anderen Teilchen reagieren. Die Ausdrücke in der Lagrange-Funktion, welche die Teilchenmassen festlegen, bestimmen auch die Eigenschaften solcher Wechselwirkungen. Wir können also Experimente durchführen, um jene Wechselwirkungsterme quantitativ zu überprüfen. Stärke der Wechselwirkung und Größe der Teilchenmasse sind in eindeutiger Weise miteinander verknüpft.

Drittens folgen aus den theoretisch möglichen Gruppen von Higgs-Feldern, die im Standardmodell oder in diversen SSMs auftreten können, jeweils charakteristische Gruppen von Higgs-Bosonen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Auch diese Alternativen lassen sich experimentell entscheiden. Dafür brauchen wir allerdings passende Teilchenbeschleuniger: Ihre Energie muss ausreichen, die verschiedenen Higgs-Bosonen zu erzeugen, ihre Intensität muss genügend viele davon produzieren und die Detektoren müssen fähig sein, die exotischen Produkte zu analysieren.

Ein praktisches Problem bei solchen Experimenten ist, dass wir die Theorien noch nicht gut genug verstehen, um daraus die Massen der Higgs-Bosonen selbst zu berechnen. Das erschwert die Suche, da ein ganzer Massenbereich durchforstet werden muss.

Der Large Electron-Positron Collider (Lep) am europäischen Kernforschungszentrum Cern bei Genf deckte einen Massenbereich ab, der immerhin eine gewisse Chance für den Nachweis eines Higgs-Bosons bot. Das gelang nicht – bis auf ein einziges Anzeichen bei höchstmöglicher Lep-Energie und -Intensität –, bevor die Anlage im Jahr 2000 abgeschaltet wurde, um dem Bau des Large Hadron Collider (LHC) Platz zu machen. Das Higgs-Teilchen muss demnach schwerer als 120 Protonenmassen sein.

Der Large Hadron Collider ist als Higgs-Fabrik konzipiert – das heißt, er soll täglich viele dieser Teilchen erzeugen

Dennoch lieferte Lep Indizien für die Existenz eines Higgs-Bosons: Mehrere präzise Lep-Daten lassen sich mit ähnlichen Messungen am Tevatron und am Beschleuniger des Stanford Linear Accelerator Center (Slac) kombinieren. Der gesamte Datensatz passt nur dann zur Theorie, wenn bestimmte Wechselwirkungen von Teilchen mit dem leichtesten Higgs-Boson berücksichtigt werden, wobei dieses nicht schwerer sein darf als rund 200 Protonenmassen. Das liefert den Forschern eine willkommene Obergrenze für die Masse des Higgs-Bosons.

Daten aus der Higgs-Fabrik

In den nächsten Jahren wird das Tevatron der einzige Beschleuniger sein, der direkte Beweise für Higgs-Bosonen liefern könnte. Seine Energie reicht im Prinzip aus, um Higgs-Bosonen in dem durch Lep angezeigten Massenbereich zu entdecken – freilich nur, falls es die geplante Strahlintensität dauerhaft zu erreichen vermag, was bisher nicht gelang.

Im Jahr 2007 soll der LHC mit siebenfach höherer Energie und viel größerer Intensität als das Tevatron in Betrieb gehen. Der gigantische Beschleuniger ist als Higgs-Fabrik konzipiert, das heißt, er soll täglich viele dieser Teilchen erzeugen. Falls alles wie geplant funktioniert, wird das Sammeln und Interpretieren der Daten ein bis zwei Jahre dauern. Die vollständigen Tests, die im Detail nachweisen, dass die Wechselwirkung mit Higgs-Feldern die Masse liefert, werden einen neuen Elektron-Positron-Collider erfordern – zusätzlich zum LHC, der Protonen zur Kollision bringt, und zum Tevatron, das Protonen und Antiprotonen aufeinander schießt. ▷

▷ Diese Experimente werden nicht nur zeigen, ob der Higgs-Mechanismus tatsächlich die Masse erzeugt, sondern auch, wie das Standardmodell erweitert werden kann, um das Wesen der Dunklen Materie zu erklären.

Eine entscheidende Rolle in dieser Frage spielt das leichteste supersymmetrische Partikel, kurz LSP. Unter den vom SSM vorhergesagten Superpartnern der bekannten Standardmodell-Teilchen hat das LSP die kleinste Masse. Die meisten Superpartner gehen sofort in supersymmetrische Teilchen geringerer Masse über. Wenn ein Superpartner zerfällt, muss mindestens eines der Zerfallsprodukte ein anderer Superpartner sein; er darf nicht vollständig in Standard-Teilchen übergehen. Diese Zerfallskette endet mit dem LSP: Es ist stabil, weil es kein leichteres Teilchen gibt, in das es sich verwandeln könnte. Supersymmetrische Teilchen dürften zu Beginn des Urknalls entstanden und sofort in LSPs zerfallen sein. Der LSP ist der führende Kandidat für die Dunkle Materie.

Vielleicht beeinflussen die Higgs-Bosonen auch direkt die Menge der Dunklen Materie im Universum. Die Anzahl der LSPs muss sich seit dem Urknall verringert haben, weil manche sich durch Zusammenstöße und Paarvernichtung in Quarks, Leptonen und Photonen verwandelten. Die Vernichtungsrate dürfte hauptsächlich von der Wechselwirkung zwischen LSPs und Higgs-Bosonen abhängen.

Wie erwähnt verursachen im SSM zwei Higgs-Felder die Masse der Standardteilchen – und einen Teil der Masse von Superpartnern wie dem LSP. Ihre restliche Masse beziehen die Superpartner aus zusätzlichen Wechselwirkungen mit weiteren Higgs- oder Higgs-ähnlichen Feldern. Dafür gibt es theoretische Modelle, aber solange wir keine Daten über die Superpartner haben, lässt sich über die Details nur spekulieren. Solche Daten erhoffen wir vom LHC oder vielleicht schon vom Tevatron.

Das Familienproblem

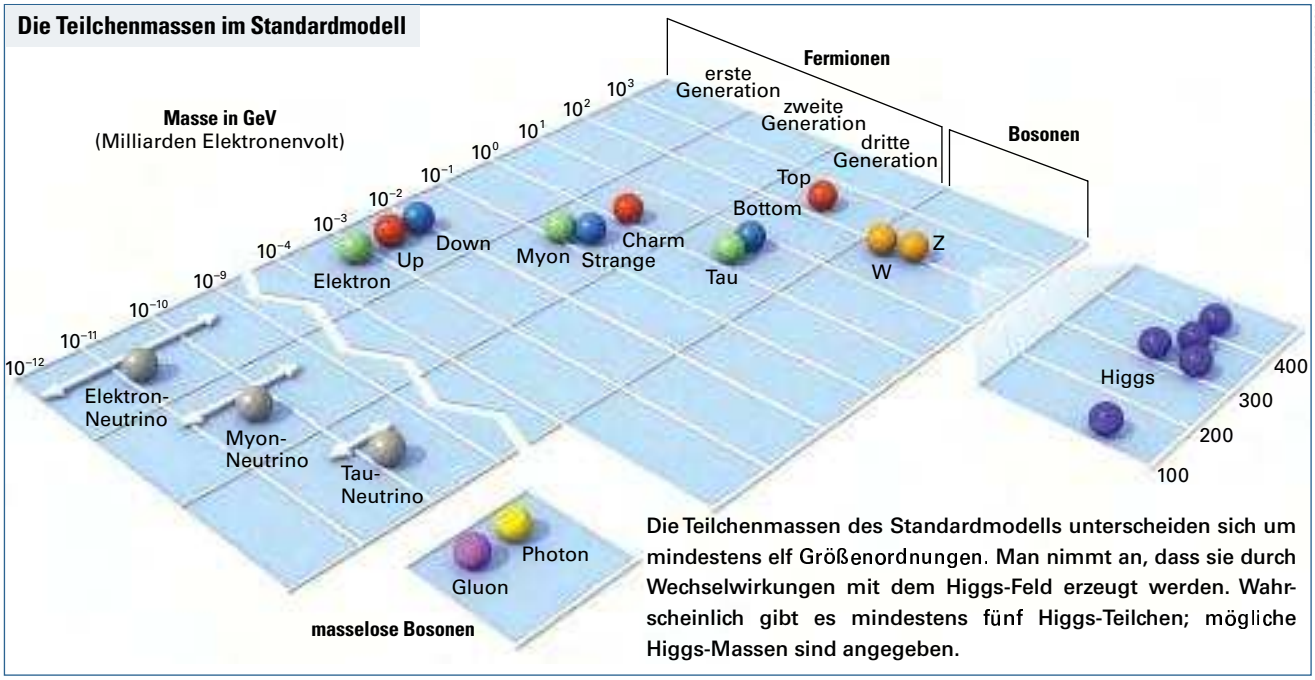
Auf höchst interessante Weise gehen vielleicht auch die Neutrinomassen aus Wechselwirkungen mit weiteren Higgs- oder Higgs-ähnlichen Feldern hervor. Neutrinos galten ursprünglich als masselos, aber seit 1979 wurde vermutet, dass sie eine winzige Masse tragen. Im letzten Jahrzehnt haben mehrere eindrucksvolle Experimente diese Vorhersage bestätigt. Die Neutrinomassen betragen weniger als ein Millionstel der – nächstgrößeren – Masse des Elektrons. Da Neutrinos elektrisch neutral sind, ist die theoretische Beschreibung ihrer Massen komplizierter als bei geladenen Teilchen. Zur Masse jeder Neutrinoart tragen mehrere Prozesse bei und aus technischen Gründen ergibt sich der tatsächliche Massenwert aus der Lösung einer Gleichung statt aus der bloßen Addition von Termen.

Damit überblicken wir nun also die drei Mechanismen der Massenentstehung: Die uns vertraute Masse – die der Protonen und Neutronen und somit der Atome – entsteht aus der Bewegung der im Innern von Protonen und Neutronen gebundenen Quarks; der Wert der Protonmasse wäre auch ohne Higgs-Feld fast derselbe. Hingegen werden die Massen der Quarks und auch die Masse des Elektrons zur Gänze vom Higgs-Feld verursacht; sie würden ohne das Higgs verschwinden.

Und schließlich die Superpartner: Ihre Massen und somit die Masse des Dunkle-Materie-Teilchens – sofern es sich dabei wirklich um den leichtesten Superpartner handelt – stammen von zusätzlichen Mechanismen jenseits der grundlegenden Higgs-Wechselwirkung.

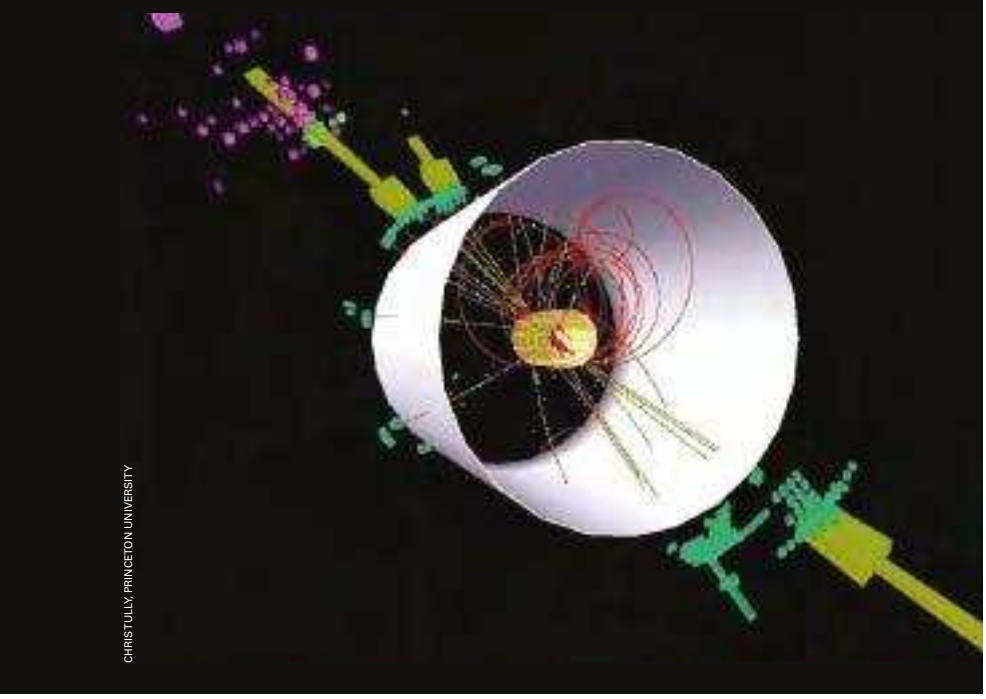
Möglicherweise wurde ein Higgs-Teilchen erzeugt, als ein hochenergetisches Positron und ein Elektron im L3-Detektor des Large Electron-Positron Collider am Cern kollidierten. In der Computergrafik stellen die feinen Linien Teilchenspuren dar. Die grünen und violetten Kleckse sowie die goldfarbenen Balken stehen für Energiebeträge, welche die bei der Reaktion erzeugten Teilchen in den Detektorschichten abgaben. Nur durch Kombinieren vieler solcher Ereignisse können die Physiker unterscheiden, ob bei einigen Reaktionen tatsächlich Higgs-Teilchen beteiligt waren oder ob nur zufällig gelegentlich Higgs-ähnliche Signale entstanden.

Die Teilchenmassen im Standardmodell



Die Teilchenmassen des Standardmodells unterscheiden sich um mindestens elf Größenordnungen. Man nimmt an, dass sie durch Wechselwirkungen mit dem Higgs-Feld erzeugt werden. Wahrscheinlich gibt es mindestens fünf Higgs-Teilchen; mögliche Higgs-Massen sind angegeben.

BRYAN CHRISTIE DESIGN



CHRIS TULLY, PRINCETON UNIVERSITY

In den vergangenen fünfzig Jahren haben die Physiker gezeigt, dass die uns umgebende Welt – ob Menschen, Pflanzen oder Sterne – aus nur sechs Teilchenarten aufgebaut ist: drei Materieteilchen (Up-Quarks, Down-Quarks und Elektronen), zwei Kraftquanten (Photonen und Gluonen) und Higgs-Bosonen. Allerdings gibt es vier weitere Quarktypen (Charm, Strange, Top und Bottom), zwei dem Elektron ähnliche Teilchen (Myon und Tau) sowie drei Neutrinos (Elektron-, Myon- und Tau-Neutrino). Sie sind freilich sehr kurzlebig oder wechselwirken kaum mit den anderen sechs Teilchen. Sämtliche Partikel lassen sich in drei Familien ordnen: Up, Down, Elektron-Neutrino und Elektron; Charm, Strange, Myon-Neutrino und Myon; Top, Bottom, Tau-Neutrino und Tau. In jeder Familie unterhalten deren Mitglieder genau dieselben Wechselwirkungsbeziehungen wie die in den anderen Familien. Der einzige Unterschied ist, dass die Teilchen der zweiten Familie schwerer sind als die der ersten und die der dritten noch schwerer. Die Tau-Masse beträgt rund 3400 Elektronmassen, und die Masse des Top-Quarks ist 50 000-mal so groß wie die des Up-Quarks. Da all diese Werte aus dem Higgs-Mechanismus hervorgehen, müssen die Teilchen höchst unterschiedlich mit dem Higgs-Feld wechselwirken.

Somit besteht das Familienproblem aus zwei Fragen: Warum gibt es drei Familien, wenn zur Beschreibung unserer Alltagswelt schon eine auszureichen scheint? Weshalb sind die Massen von Familie zu Familie so verschieden – und gerade mit diesen Werten?

Ein Physiker muss sich wundern, wenn es in der Natur drei fast identische Teilchenfamilien gibt, wo doch eine ausreichen würde. Wer die Naturgesetze und die elementaren Teilchen und Kräfte vollständig verstehen möchte, erwartet, dass jeder Aspekt der Grundgesetze notwendig ist. Am Ende soll eine Theorie stehen, aus der alle Teilchen und ihre Massenverhältnisse zwangsläufig folgen – ohne Ad-hoc-Annahmen über die Massenwerte und nachträglich angepasste Parameter. Wenn die Existenz dreier Familien notwendig ist, dann ist dies ein Indiz, dessen Bedeutung wir derzeit noch nicht verstehen.

Der große Zusammenhang

Standardmodell und SSM können die beobachtete Familienstruktur zwar beschreiben, aber nicht erklären. Das ist eine starke Aussage. Das SSM vermag nicht nur vorläufig die Familienstruktur nicht zu erklären, sondern es ist dazu prinzipiell unfähig. Der aufregendste Aspekt der Stringtheorie ist für mich gar nicht so sehr, dass sie uns vielleicht eine Quantentheorie aller Kräfte liefert, sondern vor allem, dass sie uns vielleicht erklärt, was die Elementarteilchen sind und warum es drei Familien gibt. Anscheinend vermag die Stringtheorie die Frage zu behandeln, warum die Familien mit dem Higgs-Feld unterschiedlich wechselwirken. In der Stringtheorie können mehrere Familien vorkommen und sie sind nicht identisch. Die Unterschiede betreffen weder die starke, schwache oder elektromagnetische Kraft noch die Gravitation, sondern nur die Wechselwirkungen mit den Higgs-Feldern – und das passt wunderbar zu drei Familien mit unterschiedlichen Massen.

Obwohl die Stringtheoretiker das Problem der drei Familien noch nicht ganz gelöst haben, scheint diese Theorie die richtige Struktur zu haben. Sie lässt allerdings viele verschiedene Familienstrukturen zu, und bisher weiß niemand, warum die Natur sich gerade für diejenige entschieden hat, die wir beobachten (siehe »Die Landschaft der Stringtheorie« von Raphael Bousso und Joseph Polchinski, Spektrum Spezial 1/2005, S. 54). Daten zu den Massen von Quarks und Leptonen sowie zu denen ihrer Superpartner liefern hoffentlich Anhaltspunkte für die richtige Stringtheorie.

Wir verstehen nun, warum es so lange gedauert hat, bis das Problem der Masse überhaupt als solches erkannt wurde. Ohne das Standardmodell der Teilchenphysik und die Formulierung der Quantenfeldtheorie für die Beschreibung der Teilchen und ihrer Wechselwirkungen konnten die Physiker nicht einmal die richtigen Fragen formulieren.

Zwar können wir den Ursprung und die Werte der Teilchenmassen noch nicht vollständig erklären, doch wahrscheinlich stimmt zumindest der theoretische Rahmen, bestehend aus dem Standardmodell, seiner supersymmetrischen Erweiterung und der Stringtheorie. Ob das theoretische Rüstzeug ausreicht, muss sich erst zeigen. Jedenfalls ist das Wesen der Masse heute ein etablierter Forschungsgegenstand der Teilchenphysik. ◁

Gordon Kane ist Teilchentheoretiker und Physikprofessor an der Universität von Michigan in Ann Arbor. Er erforscht Methoden zur Überprüfung und Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik. Insbesondere befasst er sich mit Higgs-Physik und den Konsequenzen der Stringtheorie für Teilchenphysik und Kosmologie.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Das Kleine Buch vom Big Bang: eine Kosmos-Fibel. Von Craig J. Hogan. Deutscher Taschenbuch-Verlag, 2000

Supersymmetry: Unveiling the ultimate laws of nature. Von Gordon Kane. Perseus Publishing, 2001

Mass without mass II: The medium is the massage. Von Frank Wilczek in: Physics Today, Bd. 53, S. 13, 2000

The particle garden. Von Gordon Kane. Perseus Publishing, 1996

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Verhinderte der Mensch eine Eiszeit?

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Anscheinend haben schon die Bauern der Jungsteinzeit einen bedeutenden Treibhauseffekt ausgelöst, als sie bei der Rodung von Wäldern und dem Anbau von Nassreis große Mengen Kohlendioxid und Methan freisetzten.

Von William F. Ruddiman

Mit der Errichtung von Kraftwerken und Fabriken, die Energie durch Verbrennung von Kohle gewinnen, begannen die Industrienationen im 19. Jahrhundert, in großem Stil Kohlendioxid (CO_2) und andere Treibhausgase in die Luft zu blasen. Später trugen Motorfahrzeuge zu diesen Emissionen bei. In Wissenschaft und Öffentlichkeit herrscht deshalb die verbreitete Ansicht, das Industriezeitalter markiere den Zeitpunkt, zu dem der Mensch erstmals in das irdische Klimasystem eingriff und die bis heute andauernde globale Erwärmung initiierte. Doch nun sieht es so aus, als hätten wir schon viel früher den natürlichen Strahlungshaushalt der Erde beeinflusst. Anscheinend fingen unsere bäuerlich lebenden Vorfahren vor etlichen Jahrtausenden bereits an, große Mengen Treibhausgase freizusetzen und dadurch das Klima auf der Erde zu verändern.

Inzwischen gibt es nämlich Hinweise darauf, dass vor 8000 Jahren die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre plötzlich zu steigen begann, obwohl der natürliche Trend eine Abnahme erwarten ließ. Etwa 3000 Jahre später geschah dasselbe beim Methan. Die Folgen waren weit reichend. Ohne die überraschenden Knicks in den Konzentrationskurven der beiden Treibhausgase lägen die Temperaturen in den nördlichen Teilen Nordamerikas und Europas heute um drei bis vier Grad Celsius niedriger. Landwirtschaft wäre unter diesen Bedingungen nur sehr eingeschränkt möglich. Zudem hätten sich in Teilen Nordostkanadas vielleicht schon vor einigen tausend Jahren kleine Eisschilde gebildet und eine neue Eiszeit eingeläutet. Stattdessen blieb das Klima weltweit relativ warm und stabil.

Trendumkehr vor 8000 Jahren

Bis vor wenigen Jahren war niemandem aufgefallen, wie ungewöhnlich diese Umkehrungen der Treibhausgas-Trends sind. Auch mir wurde das erst klar, nachdem ich mich lange Jahre mit der irdischen Klimageschichte beschäftigt hatte. Von daher kannte ich die langfristigen, regulären Zyklen, denen der Gehalt der Atmosphäre an CO_2 und Methan in der Vergangenheit gefolgt war. Doch vor etwa 8000 Jahren wurde dieses Muster plötzlich durchbrochen. Woher kamen die zusätzlichen Treibhausgase? Meiner Ansicht nach rührten sie von menschlichen Aktivitäten her, die mit der Landwirtschaft – vor allem Rodung und Bewässerung – einhergingen.

Diese Schlussfolgerung ist durchaus gewagt. Andere Wissenschaftler reagierten deshalb nicht nur mit Zustimmung, sondern teils auch mit Skepsis – wie es eben ist, wenn neue Ideen vorgestellt werden, die zwar plausibel, aber noch nicht zweifelsfrei bewiesen sind. Derzeit bin ich dabei, meine Hypothese gründlich zu prüfen und weitere Belege dafür zusammenzutragen.

Seit den 1970er Jahren ist bekannt, dass über Jahrmillionen hinweg drei periodische Schwankungen der Erdumlaufbahn um die Sonne die langfristige Klimaentwicklung auf der Erde bestimmt haben. Diese orbitalen Zyklen, die mit Perioden von 100 000, 41 000 und 22 000 Jahren ablaufen, lassen sich vorausberechnen. Sie führen unter anderem dazu, dass ▷

Schon seit mindestens 2000 Jahren werden Reisterrassen bewirtschaftet – wie hier in der Provinz Guizhu in China.

PHOTO RESEARCHERS INC. / GEORG GERSTER

STAATLICHE MUSEEN KASSEL (WWW.MUSEUM-KASSEL.DE)

Durch die Rodung von Wäldern und die Viehzucht setzten auch die ersten Bauern in Europa – Angehörige der Bandkeramikkultur – Treibhausgase frei. Einen Eindruck von ihrer Lebensweise vermittelt die Aufnahme eines Dioramas aus der Ausstellung für Vor- und Frühgeschichte im Hessischen Landesmuseum in Kassel.

▷ die Intensität des Sonnenlichts, das verschiedene Teile des Erdballs innerhalb einer bestimmten Jahreszeit erreicht, um mehr als zehn Prozent variieren kann. In den letzten drei Millionen Jahren haben solche regelmäßigen Schwankungen eine lange Folge von Kaltzeiten hervorgerufen, in denen weite Bereiche der Kontinente auf der Nordhalbkugel mit Eis bedeckt waren. Dazwischen gab es jeweils kurze warme Phasen, so genannte Interglaziale.

Was Luftblasen im Eis verraten

Dutzende dieser Klimaschwankungen folgten im Verlauf von Jahrmillionen aufeinander, während sich die Hominiden allmählich zum anatomisch modernen Menschen entwickelten. Gegen Ende der jüngsten Kaltzeit – vor etwa 12 000 Jahren – schrumpften die Eisschilde, die Nordeuropa und Nordamerika 100 000 Jahre lang bedeckt hatten. Vor 6000 Jahren waren sie schließlich ganz verschwunden. Bald darauf erbauten unsere Vorfahren Städte, erfanden die Schrift und gründeten Religionen. Viele Wissenschaftler schreiben den zivilisatorischen Fortschritt zum großen Teil dieser natürlichen Wärmelücke zwischen weniger günstigen Vereisungsphasen zu. Doch meiner Meinung nach ist das allenfalls die halbe Wahrheit.

In den vergangenen Jahren lieferten Eisbohrkerne aus Grönland und der Antarktis detaillierte Hinweise auf das Erdklima der Vergangenheit. Luftblasen in ihrem Inneren gaben zudem Aufschluss über die Zusammensetzung der Atmosphäre zu der Zeit, als das Eis sich bildete. So konnten die Paläoklimatologen auch Veränderungen im Gehalt der Atmosphäre an Treibhausgasen verfolgen. Ein zwei Kilometer langer Eisbohrkern, der in den 1990er Jahren in der Antarktis-Station Vostok gewonnen wurde, zeigte auf diese Weise, dass praktisch während der gesamten letzten 400 000 Jahre die Konzentration von CO_2 und Methan in einem regelmäßigen Muster anstieg und abnahm.

Bemerkenswert ist, dass dieses Auf und Ab im selben Rhythmus erfolgte wie die Fluktuationen in der Intensität der Sonneneinstrahlung und in der Größe der Eisdecken. Beispielsweise hat die bedeutendste Schwankung der Methankonzentration dieselbe Periode von 22 000 Jahren wie ein orbitaler Zyklus, der mit der Präzession unseres Planeten zusammenhängt. Die Erdachse taumelt nämlich wie der Mast eines schlingernden Schiffs oder wie ein Kreisel, den man seitlich anstößt. Außerdem ist die Erdbahn elliptisch, sodass der Abstand unseres Planeten von der Sonne während eines Umlaufs variiert. Gäbe es keine Präzession, würde der sonnennächste Punkt – das so genannte Perihel – immer am selben Tag im Jahr erreicht. Wegen des Taumelns der Erdachse aber wandert dieser Punkt innerhalb von 22 000 Jahren einmal durch alle Jahreszeiten (Kasten rechts).

Irgendwann tritt das Perihel dabei auch während des (nördlichen) Sommers auf. Dann ist die Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel um diese Jahreszeit maximal. In heißen Sommern aber sprudelt auch die wichtigste natürliche Methanquelle besonders kräftig: die Zersetzung pflanzlichen Materials in Feuchtgebieten. Wenn die Vegetation in Sümpfen und flachen Gewässern nach der sommerlichen Blüte im Frühherbst abstirbt, erzeugen anaerobe Bakterien bei ihrem Abbau nämlich Methan, das deshalb auch Sumpfgas genannt wird.

Ein sehr heißer Sommer steigert die Produktion dieser Kohlenstoffverbindung in zweifacher Weise. Einerseits zieht die Wärme in Südasien zusätzliche, feuchtigkeitsbeladene Luft vom Indischen Ozean an. Es kommt zu starken tropischen Monsunregenfällen, die auch Gebiete unter Wasser setzen, in denen es normalerweise keine Überschwemmungen gibt. Andererseits verlängert sich die Zeitspanne, in der die borealen Feuchtgebiete im hohen Norden Asiens und Europas aufgetaut sind.

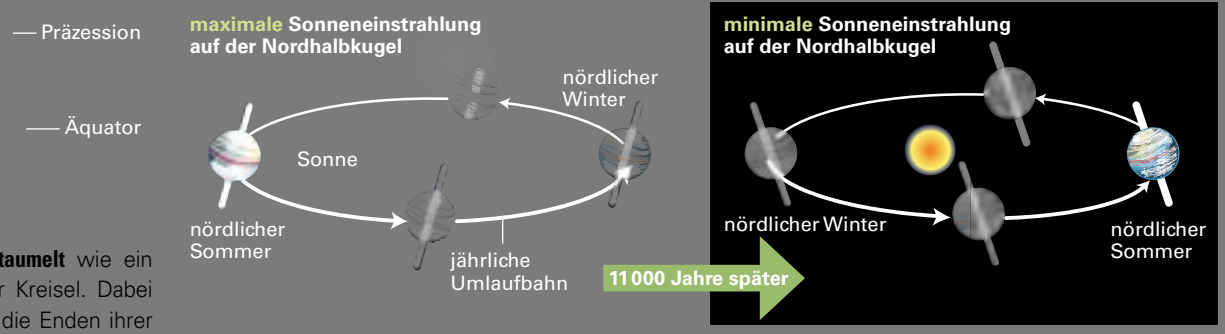
Beide Effekte lassen alle 22 000 Jahre die Vegetation auf der Nordhalbkugel üppiger sprießen. Damit kommt es aber

IN KÜRZE

▶ Nach gängiger Sicht stören Treibhausgase, die der Mensch durch seine Aktivitäten freisetzt, seit etwa 200 Jahren **das empfindliche Erdklima**.

▶ Nach neuesten Erkenntnissen brachten unsere Vorfahren jedoch schon vor Jahrtausenden den Ausstoß bedeutender **Mengen an Treibhausgasen** in Gang, indem sie für landwirtschaftliche Zwecke Wälder rodeten und Felder bewässerten.

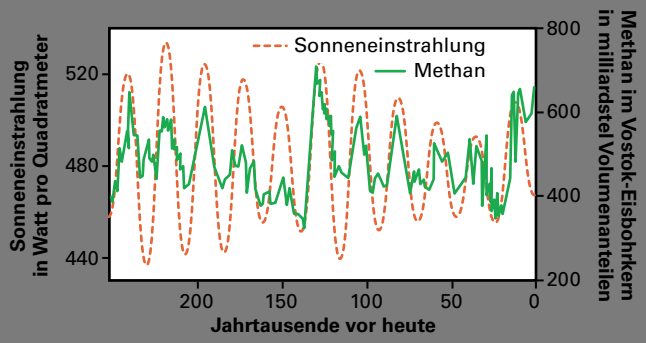
▶ Dadurch hielt die Menschheit den Planeten merklich wärmer, als er sonst gewesen wäre – und verhütete vielleicht sogar den **Beginn einer neuen Eiszeit**.



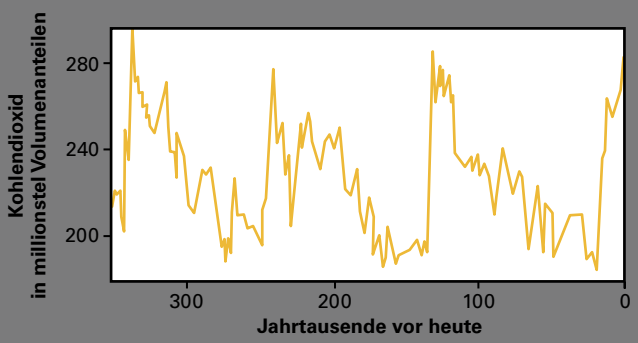
Die Erde taumelt wie ein kippender Kreisel. Dabei zeichnen die Enden ihrer Rotationsachse Kreise in das All. Eine volle Umdrehung dauert 22 000 Jahre. Durch diese »Präzession« schwankt die Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel.

Die Nordhalbkugel erwärmt sich im Sommer bei dieser Neigungsrichtung am stärksten, da die Erde zu diesem Zeitpunkt den sonnennächsten Punkt ihrer Bahn erreicht hat.

11 000 Jahre später hat sich die Erdachse wegen der Präzession zur anderen Seite geneigt. Nun ist die Erde während des nördlichen Sommers am weitesten von der Sonne entfernt und wird entsprechend schwächer beschienen.



Der Methangehalt der Lufthülle stieg und fiel innerhalb der letzten 250 000 Jahre weit gehend parallel zum präzessionsbedingten Auf und Ab der Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel. Der Grund: Je wärmer der nördliche Sommer ist, desto mehr Methan entsteht in Feuchtgebieten, der Hauptquelle dieses Treibhausgases in der Atmosphäre.



Auch der Kohlendioxidgehalt der Lufthülle schwankte in den letzten 350 000 Jahren nach einem regelmäßigen Muster. Es wurde allerdings nicht nur vom Präzessionszyklus bestimmt, sondern zusätzlich von periodischen Änderungen in der Neigung der Erdachse und in der Form der Umlaufbahn. Diese anderen Zyklen haben Perioden von 41 000 und 100 000 Jahren.

▷ Methangehalt der Atmosphäre stieg bis kurz vor Beginn des Industriezeitalters langsam, aber stetig wieder auf fast 700 ppb an. Er nahm also zu, obwohl er hätte sinken müssen, und lag schließlich um 250 ppb höher als zum vergleichbaren Zeitpunkt in früheren Zyklen.

Genauso ungewöhnlich wie Methan hat sich in den letzten Jahrtausenden auch das CO_2 verhalten. Obwohl seine Konzentrationsschwankungen von einer komplexen Überlagerung aller drei orbitalen Kreisläufe bestimmt werden, verliefen die Trends in früheren Interglazialen sehr ähnlich. Zu Beginn jeder Warmzeit, noch bevor die letzten Reste der großen Eisdecken abgeschmolzen waren, traten Spitzenwerte von 275 bis 300 millionstel Volumenanteilen (ppm) auf. Innerhalb der darauf folgenden 15000 Jahre fiel die Konzentration allmählich auf einen mittleren Wert von 245 ppm.

Im jetzigen Interglazial erreichte der CO_2-Gehalt der Luft den typischen Höchstwert vor rund 10500 Jahren und nahm dann erwartungsgemäß allmählich ab. Doch anstatt weiterhin langsam zu fallen, begann er vor 8000 Jahren anzusteigen – bis auf 285 ppm zu Beginn des Industriezeitalters. Damit lag er um rund 40 ppm höher, als nach dem früheren Verhalten zu erwarten war.

Was konnte diese unerwartete Umkehr der natürlichen Trends sowohl für Methan als auch für CO_2 verursacht haben? Andere Forscher machen natürliche Klimafaktoren dafür verantwortlich. Die Methanzunahme schreiben sie der Ausbreitung der Feuchtgebiete in arktischen Regionen zu. Als Grund für den CO_2-Anstieg betrachten sie einen natürlichen Rückgang kohlenstoffreicher Vegetation auf den Kontinenten sowie Veränderungen in der Chemie der Ozeane.

Landwirtschaft als neuer Klimafaktor

Doch diese Erklärungen können aus einem einfachen Grund nicht stimmen: In den letzten Jahrtausenden herrschten weit gehend die gleichen Bedingungen wie während der vier vorangegangenen Interglaziale. Die Eisdecken im Norden waren abgeschmolzen und die borealen Wälder hatten das so frei gewordene Land zurückerobert. Durch Schmelzwasser lag der Meeresspiegel auf seinem hohen interglazialen Niveau und die sommerliche Sonneneinstrahlung auf der Nordhemispäre ging wegen des Präzessionszyklus wieder langsam zurück.

Warum also sollten die Gaskonzentrationen während der vergangenen vier Zwischeneiszeiten abgenommen haben, im jetzigen Interglazial dagegen angestiegen sein? Meiner Ansicht nach gibt es nur eine Erklärung: In den letzten Jahrtausenden ist ein neuer klimawirksamer Faktor hinzugekommen.

Einleuchtendster Kandidat dafür scheint mir die Landwirtschaft. Der zeitliche Ablauf ihrer Einführung und Verbreitung ist in den Grundzügen bekannt. Ihren Anfang nahm sie vor etwa 11000 Jahren in einer Region im östlichen Mittelmeerraum, dem so genannten Fruchtbaren Halbmond. Kurz darauf kam sie auch in Nordchina auf, einige tausend Jahre später schließlich in Nord- und Südamerika. Von ihren Ursprungsorten breitete sie sich allmählich in andere Regionen aus und entwickelte sich weiter. Vor 2000 Jahren wurde jede Nutzpflanze, die wir heute essen, schon irgendwo auf der Welt kultiviert.

Bei diversen Anbaumethoden entsteht Methan. So wird es frei, wenn Bauern Grasland abbrennen, um den Boden zu düngen. Außerdem bildet sich das Gas in den Eingeweiden von Menschen und ihren Haustieren – vor allem in den Mä-

Menschliche Aktivitäten und Treibhausgase

Gegen Ende der letzten Eiszeit vor etwa 11000 Jahren erfanden unsere Vorfahren die Landwirtschaft. Ungefähr zur selben Zeit erreichten die Gehalte der Atmosphäre an Kohlendioxid (CO_2) und Methan einen Höhepunkt. Hätten sie anschließend denselben Verlauf genommen wie in den vorangegangenen Zwischeneiszeiten, wären sie bis zum Beginn des Industriezeitalters stetig gefallen.

Stattdessen stoppte der Abwärtstrend vor etwa 8000 beziehungsweise 5000 Jahren. Seither zeigt die Konzentrationskurve bei beiden Gasen beständig nach oben.

Die Einführung bedeutender landwirtschaftlicher Neuerungen – allen voran Rodung und Reisbewässerung – könnte die überraschende Trendumkehr erklären.

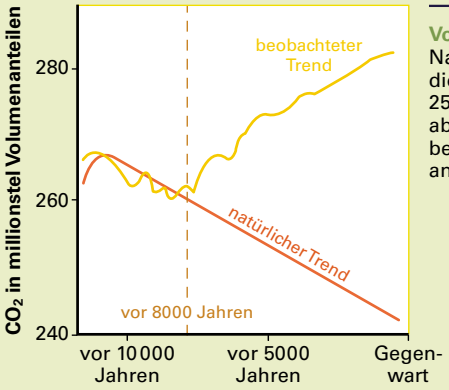
Vor 11000 Jahren:
In Mesopotamien und China wird die Landwirtschaft erfunden.

paläolithische Sichelklinge

verkohlter Weizen

Vor 8000 Jahren:
In der späten Jungsteinzeit beginnen Menschen in Europa mit der Rodung der Wälder, um Weizen, Gerste, Erbsen und andere nicht einheimische Pflanzen anzubauen.

vor 10000 Jahren | vor 8000 Jahren



Vor 8000 Jahren:
Nachdem der Kohlendioxidgehalt der Luft 2500 Jahre lang abgenommen hat, beginnt er plötzlich anzusteigen.

Vor 7500 Jahren:
Menschen kultivieren den Wildreis.

SICHELMESSER UND VERKOHLTER WEIZEN: ÄGYPTISCHE ARCHÄOLOGIE DES UNIVERSITY COLLEGE LONDON; REIS: CORBIS / JONATHAN BLAIR; DIAGRAMM: LUCY READING-IKKANDA

gen von Wiederkäuern – und entweicht von dort in die Luft. All diese Faktoren trugen – bei wachsender Weltbevölkerung – wahrscheinlich zu einem allmählichen Anstieg des Methangehalts bei.

Doch vor allem ein Vorgang dürfte vor rund 5000 Jahren den jähen Umschwung von einem natürlichen Rückgang zu einem überraschenden Anstieg bewirkt haben: die Einführung des Nassreis-Anbaus in Südasien. Felder, die von Menschenhand überflutet werden, geben das Gas aus dem gleichen Grund ab wie natürliche Feuchtgebiete: weil anaerobe Bakterien abgestorbenes Pflanzenmaterial in stehenden Gewässern zersetzen.

Südchinesische Bauern begannen vor ungefähr 4000 Jahren, flache Gebiete in Flussnähe unter Wasser zu setzen, um dort Feuchtigkeit liebende Reissorten zu pflanzen. In Südostasien erstrecken sich am Rand etlicher großer Flüsse ausgedehnte Niederungen. Deshalb konnten dort schon bald nach der Einführung dieser Bewässerungsmethode weite Landstriche überflutet werden. Damit wäre die plötzliche Umkehr des Emissionstrends beim Methan erklärbar.

Historische Quellen legen nahe, dass sich der Reisanbau mit künstlicher Bewässerung damals rasch ausbreitete. Vor 3000 Jahren war er nach Süden hin bis Indochina und in Richtung Westen bis zum Gangestal in Indien vorgedrungen. Ein Jahrtausend später begannen die Bauern Reisterrassen an den steilen Hängen Südostasiens anzulegen.

Eines Tages gibt es vielleicht quantitative Schätzungen über den Umfang der bewässerten Fläche und die produzierte Methanmenge innerhalb dieser 5000 Jahre. Bisher kann ich mich nur auf qualitative Überlegungen stützen. Exakte Daten zu gewinnen dürfte sehr schwierig sein; denn durch die bis heute fortdauernde Bewässerung derselben Gebiete sind viele der älteren Zeugnisse wahrscheinlich zerstört worden.

Großräumige Abholzung

Eine weitere Praxis, die mit der Einführung der Landwirtschaft einherging, war die Abholzung. Sie liefert eine plausible Erklärung für das Einsetzen des anomalen CO_2-Trends. Um Nutzpflanzen in Gebieten anbauen zu können, die von Natur aus bewaldet sind, müssen Bäume gefällt werden. Deshalb begannen die Bauern in Europa und China vor 8000 Jahren mit dem Roden. Anfangs benutzten sie dazu Axtklingen aus Stein, später solche aus Bronze und schließlich Eisen. Ob die gefällten Bäume nun verbrannt oder dem Verrottungsprozess überlassen wurden, spielte keine Rolle: Ihr Kohlenstoff landete in jedem Fall über kurz oder lang als CO_2 in der Atmosphäre.

Datierungen zufolge begannen die Europäer ziemlich genau vor 8000 Jahren damit, ursprünglich aus dem Nahen Osten stammende Feldfrüchte wie Weizen, Gerste und Erbsen in ehemals bewaldeten Gebieten anzubauen – also just zu der Zeit, als sich der CO_2-Trend umkehrte. Überreste dieser Kulturpflanzen erscheinen zuerst in Sedimenten südosteuropäischer Seen. In den folgenden Jahrtausenden breitete sich die Landwirtschaft, wie die Ablagerungen in Gewässern zeigen, nach Westen und Norden aus. Innerhalb dieses Zeitraums gelangten auch zunehmende Mengen an Schluff und Ton von entwaldeten Hängen in Flüsse und Seen – ein direkter Hinweis auf die fortschreitende Rodung.

Den klarsten Beleg für die frühe großräumige Entwaldung liefert ein einzigartiges historisches Dokument: das Doomsday-Buch. Gemäß den Angaben in dieser englischen Landvermessungsurkunde, ▷

Vor 5000 Jahren: Bauern in Südchina beginnen Flussniederungen zu überfluten, um Reis anzubauen.

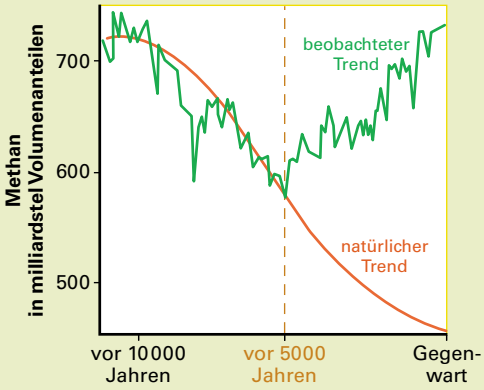
Vor 2000 Jahren: Europa, Indien, Südostasien und China haben einen Großteil ihrer natürlichen Wälder verloren. Auf den gerodeten Flächen werden Feldfrüchte wie Weizen angebaut.

Vor 200 Jahren: Durch die Verfeuerung fossiler Brennstoffe wird so viel Kohlendioxid freigesetzt wie nie zuvor.

Ottomotor

vor 6000 Jahren | vor 4000 Jahren | vor 2000 Jahren | Gegenwart

Vor 5000 Jahren: Nachdem der Methangehalt der Luft 6000 Jahre lange abgenommen hat, beginnt er plötzlich anzusteigen.



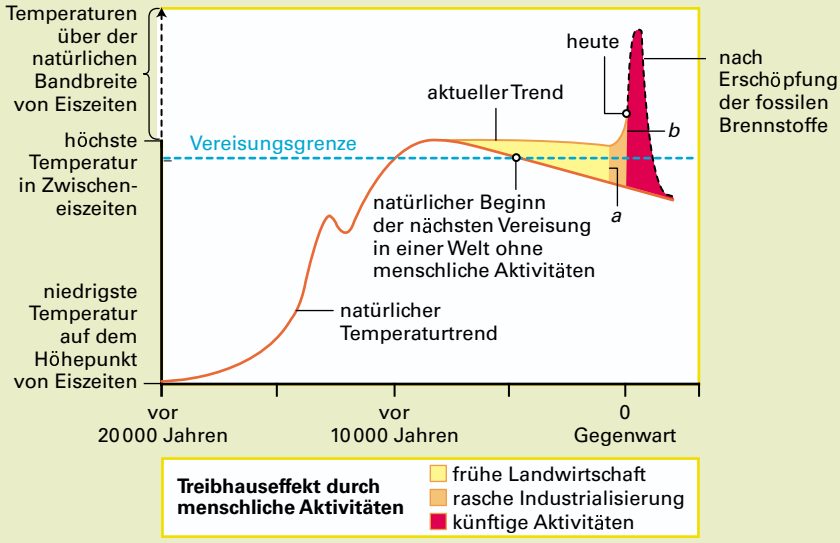
Vor 2000 Jahren: Bauern in Südostasien beginnen an steilen Hängen Reisterrassen anzulegen.

BEWÄSSERUNG: CORBIS / JULIA WATERLOW; WALDRODUNG: IMAGEBANK; WEIZENFELD: CORBIS / VINCE STREAND; OTTO-MOTOR: SSPL SCIENCE LIBRARY; REISTERRASSEN: GETTY IMAGES / DAVID GREEDY; DIAGRAMM: LUCY READING-IKKANDA

Die vertagte Eiszeit

Der vom Menschen verursachte Treibhauseffekt hat offenbar eine Eiszeit abgewendet, die andernfalls vor etwa 5000 Jahren begonnen hätte. Durch jahrtausendelange landwirtschaftliche Aktivitäten setzten unsere Vorfahren genügend CO_2 und Methan frei, um den natürlichen Abkühlungstrend in vorindustrieller Zeit weit gehend zu kompensieren (gelb) und den Planeten um durchschnittlich fast 0,8 Grad Celsius aufzuheizen *(a)* – mehr als die 0,6 Grad Celsius, die im 20. Jahrhundert auf Grund der raschen Industrialisierung hinzukamen *(b)*.

Sobald die fossilen Brennstoffe zur Neige gehen, wird sich die Erde wieder abkühlen und auf die längst überfällige nächste Eiszeit zusteuern.



LUCY READING-IKKANDA

▷ die Wilhelm der Eroberer in Auftrag gegeben hatte, waren im Jahr 1086 n. Chr. neunzig Prozent der natürlichen Waldfläche in den landwirtschaftlich genutzten Tieflandregionen Englands gerodet. Das Dokument erwähnt auch, dass damals 1,5 Millionen Menschen in England lebten. Folglich genügte eine mittlere Bevölkerungsdichte von zehn Personen pro Quadratkilometer, um die Wälder weit gehend zu vernichten.

Die hoch entwickelten Kulturen in den großen Flusstälern Chinas und Indiens hatten Jahrtausende zuvor schon viel größere Bevölkerungsdichten erreicht. Demnach waren diese Regionen, wie viele Ökologen meinen, vor etwa 2000 oder sogar 3000 Jahren bereits fast völlig kahl geschlagen. Vieles spricht also dafür, dass in Europa und Südasien während des ungewöhnlichen CO_2-Anstiegs im großen Stil Wälder gerodet wurden.

Gebremste Fahrt in den Eiskeller

Wenn Landwirte tatsächlich für eine derart große Zunahme bei der Konzentration der Treibhausgase bis zum 18. Jahrhundert – 250 ppb für Methan und 40 ppm für CO_2 – verantwortlich waren, muss ihr Tun beträchtliche Folgen für das Erdklima gehabt haben. Auf Basis der durchschnittlichen Sensitivität verschiedener Klimamodelle ergibt sich aus den Werten eine mittlere Erwärmung von fast 0,8 Grad Celsius. Das ist mehr als die 0,6 Grad Celsius, die im 20. Jahrhundert gemessen wurden. Die frühe Landwirtschaft hätte das Klima also mindestens genauso stark beeinflusst wie die Industrialisierung.

Wie konnte dieser drastische Erwärmungseffekt so lange unbemerkt bleiben? Der Hauptgrund ist wohl, dass er durch gegenläufige natürliche Klimaänderungen kaschiert wurde. Die orbitalen Zyklen der Erde verursachten gleichzeitig einen starken Abkühlungstrend, speziell in hohen nördlichen Breiten. Unter dem Strich nahmen deshalb trotz allem bis ins 19. Jahrhundert hinein die Sommertemperaturen allmählich ab.

Wäre die Konzentration der Treibhausgase in natürlicher Weise gefallen, hätte dies die Abkühlung durch den Rückgang der sommerlichen Einstrahlung verstärkt. Die globale Mitteltemperatur wäre dann weit unter den jetzigen Wert gesunken. Um dieses Szenario zu erforschen, tat ich mich mit Steve Vavrus und Juhn Kutzbach von der Universität von Wisconsin in Madison zusammen. Per Computersimulation bestimmten wir die Temperaturen, die heute herrschen würden, wenn der Mensch keine Treibhausgase erzeugt hätte. Dabei benutzten wir ein Modell, das den mittleren Status des Erdklimas – also Parameter wie Temperaturen und Niederschläge – für verschiedene Ausgangsbedingungen berechnet.

Bei der Simulation reduzierten wir die Gehalte der Atmosphäre an Treibhausgasen auf diejenigen Werte, die heute ohne jahrtausendelange Landwirtschaft und industrielle Emissionen vorhanden wären. Heraus kam, dass unser Planet fast zwei Grad Celsius kühler wäre, als er tatsächlich ist – wahrlich kein Pappenstiel. Selbst auf dem Höhepunkt der letzten Vereisung lag die mittlere weltweite Temperatur nur fünf bis sechs Grad Celsius niedriger als heute. Wir befänden uns also schon gut und gern auf halbem Weg in die nächste Eiszeit, hätten nicht jahrtausendelange landwirtschaftliche Aktivitäten und die spätere Industrialisierung über die Treibhausgase gegengesteuert.

Nach früheren Simulationen anderer Klimaforscher lägen Teile Nordostkanadas heute unter einer Eisdecke, falls die Erde nur um 1,5 bis 2 Grad Celsius kälter wäre. Dies entspricht dem Betrag der Abkühlung, den der anomale Anstieg in der Konzentration der Treibhausgase nach unseren Modellrechnungen ausgeglichen hat. Analoge Simulationen von mir und meinen Kollegen lieferten das gleiche Ergebnis. Demnach läge heute in zwei Gebieten Nordostkanadas bis in den Spätsommer hinein Schnee: auf Baffin Island am Ausgang der Hudson Bay und weiter südlich auf der Halbinsel Labrador. Schnee, der im Sommer nicht abschmilzt, sammelt sich in Jahr für Jahr dicker werdenden Schichten an und verwandelt sich schließlich in Gletschereis. In Nordostkanada hätte sich demnach vor einigen Jahrtausenden wieder eine Eisdecke gebildet – mutmaßlicher Vorbote einer neuen Eiszeit.

Dies steht in krassem Gegensatz zur traditionellen Sichtweise, wonach sich die menschliche Zivilisation innerhalb einer Wärmeperiode entwickelte, welche die Natur uns großzügig bot. So wie ich

die Dinge sehe, verhält es sich genau umgekehrt: Die Natur war dabei, den Planeten abzukühlen, doch unsere Vorfahren hielten ihn warm, indem sie die Landwirtschaft erfanden. Die Schlussfolgerung, dass die Menschheit eine Abkühlung verhinderte und wohl den Beginn eines glazialen Zyklus stoppte, leitet direkt über zu dem schon lange währenden Streit darüber, was das Erdklima für uns in naher Zukunft bereithält.

Widersprüchliche Prognosen

Die Schwierigkeiten mancher Politiker, in den 1980er Jahren die ersten Vorhersagen einer weltweiten Erwärmung zu akzeptieren, waren teilweise von den Forschern selbst verschuldet. Viele von ihnen hatten schließlich das Jahrzehnt davor fast genau das Gegenteil erzählt – nämlich behauptet, eine neue Eiszeit stünde bevor. Diese Vorhersage stützte sich auf die damals neue Erkenntnis, dass Schwankungen der Erdumlaufbahn das Wachstum und den Zerfall von Eisschilden regulieren. Wer also diese längerfristigen Veränderungen untersuchte, hatte allen Grund zu der Annahme, die nächste Eiszeit sei nur ein paar hundert oder maximal einige tausend Jahre entfernt.

Doch dann zeigte sich, dass die Konzentration von CO_2 in der Luft rasch anstieg. Zugleich erkannten Theoretiker, dass dieses Gas einen Treibhauseffekt auslöst, durch den sich die Erde erwärmen sollte – was genaue Messungen und Rekonstruktionen in der Folgezeit bestätigten. Dadurch schwenkten viele Wissenschaftler um und prophezeiten nun für die nahe Zukunft – also die nächsten ein bis zwei Jahrhunderte – eine globale Erwärmung statt einer Abkühlung. Dieser Sinneswandel, der sich auf ein verbessertes Verständnis des Klimasystems stützte, untergrub in den Augen einiger Politiker die Glaubwürdigkeit aller Vorhersagen – einer globalen Erwärmung ebenso wie einer bevorstehenden Eiszeit.

Meine Ergebnisse fügen beiden Szenarien einen neuen Aspekt hinzu. Die Vorhersage einer drohenden Eiszeit kam demnach in Wahrheit viel zu spät: Neue Eisdecken hätten sich schon vor einigen Jahrtausenden bilden müssen. Dies geschah nur deshalb nicht, weil die vom Menschen hervorgerufene globale Erwärmung tatsächlich sehr viel früher begann, als die Warner vor einem Treibhauseffekt annahmen – nämlich schon lange vor dem Industriezeitalter.

Bei solchen heiß debattierten Fragen, die in die Politik hineinreichen, werden wissenschaftliche Ergebnisse oft als Argumente für diametral entgegengesetzte Positionen herangezogen. Skeptiker der globalen Erwärmung könnten meine These als Beweis dafür anführen, dass die vom Menschen erzeugten Treibhausgase jahrtausendelang eine nützliche Rolle dabei spielten, das Erdklima angenehmer zu gestalten. Andere mögen kontern, wir hätten allen Grund, besorgt über den gegenwärtigen Anstieg der Treibhausgase im Rekordtempo auf Rekordniveaus zu sein, wenn so wenige Menschen mit vergleichsweise primitiven technischen Mitteln den Verlauf des Klimas bereits so deutlich verändern konnten.

Die rasche Erwärmung der letzten Jahrhunderte wird vermutlich noch mindestens 200 Jahre anhalten, bis die wirtschaftlich gewinnbaren fossilen Brennstoffe zur Neige gehen. Sobald dies der Fall ist, dürfte die Erde wieder allmählich abkühlen, während die Tiefsee langsam das überschüssige CO_2 anthropogenen Ursprungs verschluckt. Ob die Temperatur schließlich tief genug sinkt, um die längst überfällige Eiszeit einzuleiten oder ob unseren Nachfahren dieses Schicksal erspart bleibt, kann derzeit niemand vorhersagen. ◁

William F. Ruddiman ist Meeresgeologe und emeritierter Professor am Fachbereich Umweltwissenschaften der Universität von Virginia in Charlotteville, dem er von 1993 bis 1996 vorstand. Er hat 1969 an der Columbia-Universität in New York promoviert und während seiner Doktorarbeit erstmals Spuren von Klimaveränderungen in marinen Sedimenten untersucht. Danach arbeitete er beim Ozeanografischen Büro der US-Marine in Maryland und später am Lamont-Doherty Earth Observatory der Columbia-Universität.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Plows, plagues, and petroleum: How humans took control of climate. Von William F. Ruddiman. Princeton University Press, 2005

Deforesting the earth: From prehistory to global crisis. Von Michael A. Williams. University of Chicago Press, 2003

The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. Von William F. Ruddiman in: Climatic Change, Bd. 61, S. 261, 2003

Earth's climate: Past and future. Von William F. Ruddiman. W. H. Freeman, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Der größte Feldstecher der Welt

Zwei Riesenspiegel auf einer gemeinsamen Montierung, dazu ausgefeilte Instrumente zur Analyse des Sternenlichts – damit eröffnet das Large Binocular Telescope eine neue Ära in der beobachtenden Astronomie.

LARGE BINOCULAR TELESCOPE OBSERVATORY (LBTO); FOTOMONTAGE: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Von Klaus G. Strassmeier

Das »erste Licht« ist die Feuertaufe eines Teleskops. Konstrukteure, Techniker und Astronomen fiebern dieser ersten Bewährungsprobe mit Spannung entgegen. Ist die Optik akkurat justiert? Klappt die Nachführung einwandfrei? Verarbeitet der Detektor das eingefangene Licht auf die gewünschte Weise?

Solche und andere, weit komplexere Fragen gingen den Wissenschaftlern und Ingenieuren durch den Kopf, die am 12. Oktober 2005 nach knapp zwanzigjähriger Planungs-, Konstruktions- und Bauphase ihr neues Arbeitswerkzeug in Betrieb nahmen: das Large Binocular Telescope (LBT), eine Art gigantisches Fernglas, das dank seiner Größe und seines innovativen Designs in einer Reihe von wissenschaftlichen Fragestellungen den lang ersehnten Durchbruch bringen soll. Als erstes Objekt nahmen die Forscher die Spiralgalaxie NGC 891 im Sternbild Andromeda ins Visier. Von der Erde aus blickt man direkt in die Scheibenebene des Sternsystems hinein, sodass sich die dort angesammelten Staubmassen besonders gut abzeichnen (Bild S. 59). Die Scheibe von NGC 891 emittiert diffuse Röntgenstrahlung, was auf aktive Sternentstehung schließen lässt. In unserem optischen LBT-Bild macht sich diese Aktivität als starke Verwirbelung der Staubbänder eindrucksvoll bemerkbar.

Diese erste wissenschaftlich verwertbare Aufnahme des LBT gleicht freilich einem Schnappschuss, der die künftigen Fähigkeiten des Großteleskops noch nicht erahnen lässt. Bislang ist nämlich nur einer der beiden Spiegel montiert. Dieser ist zwar mit 8,4 Meter Durchmesser der größte Einzelspiegel, der jemals zum Einsatz kam. Doch erst, wenn sein Zwilling auf der gemeinsamen Montierung hinzugekommen ist und sich die Signale beider Spiegel überlagern, wird das Teleskop zusammen mit den speziell entwickelten Detektoren seine volle Leistungsfähigkeit erreichen. Läuft alles nach Plan, wird es Ende 2008 oder Anfang 2009 so weit sein. Das LBT wird dann Bilder liefern, die zehnmal schärfer sind als diejenigen des Hubble-Weltraumteleskops.

Auch die Fähigkeit des LBT, lichtschwache Objekte zu untersuchen, wird ohne Vorbild sein. Das menschliche Auge vermag in einer dunklen Nacht noch das Licht einer drei Kilometer entfernten Kerze wahrzunehmen. Mit einem gewöhnlichen Feldstecher kann man sie noch in zehn Kilometer Entfernung erkennen. Das Hubble-Weltraumteleskop könnte sie sogar sehen, wenn sie sich auf dem Mond befände. Mit dem LBT ließe sich die gleiche Kerze noch in 2,5 Millionen Kilometer Entfernung nachweisen – das entspricht dem sechsfachen Abstand des Monds von der Erde.

Im Vollbetrieb des LBT wird den Astronomen ein leistungsfähiges Allroundgerät als Observatorium zur Verfügung stehen. Trabanten der Sonne, die weit jenseits der Neptunbahn unser Zentralgestirn umrunden, werden sich ebenso direkt nachweisen lassen wie Planeten, die um andere Sterne kreisen. Die Beobachtung ferner Galaxien wiederum liefert Erkenntnisse über die frühen Entwicklungsstadien unseres Universums. Eine Reihe von exotischen Himmelsobjekten – Neutronensterne, extrem massereiche Schwarze Löcher und kosmische Gammastrahlenausbrüche – wird ihre Geheimnisse preisgeben müssen. Selbst kosmische Magnetfelder kann das LBT vermessen. Mit den Resultaten, so die Hoffnung der Wissenschaftler, wird die Menschheit der Beantwortung der drei »W-Fragen« ein Stück näher kommen, die seit Jahrtausenden den Grundstock unseres naturwissenschaftlichen Fragenkatalogs bilden: Woher kommen wir, was sind wir und wohin gehen wir?

Mehr Licht – mehr Wissen

»Gebt mir einen Stein vom Mond und ich sage euch, wie das Sonnensystem entstanden ist«, meinte ein Astrophysiker der Nasa kurz vor der ersten Apollo-Mission Ende der 1960er Jahre. Wissenschaftler haben seitdem etwa 100 Kilogramm Mondgestein akribisch untersucht und Antworten auf Fragen gefunden, die wir in den 1960er und 1970er Jahren noch nicht einmal stellen konnten. Wie genau das Sonnensystem entstanden ist, wissen wir allerdings noch immer nicht. Die Komplexität des Problems, gepaart mit unserem nach wie vor sehr unvollständigen Verständnis grundlegender physikalischer Prozesse, zum Beispiel der Viskosität, führt oft zu einem unlösbaren Konstrukt. Dann helfen meist nur neue Beobachtungen weiter, welche die Vielzahl möglicher Theorien weiter einschränken.

Übertragen auf das LBT könnten wir in Analogie zum Nasa-Zitat jetzt behaupten: »Gebt mir ein Spektrum eines Sterns und ich sage euch, wie er aufgebaut ist.« Ganz so einfach ist es ▷

◀ **Das Large Binocular Telescope (LBT) entsteht auf dem Mount Graham im Süden Arizonas. Die beiden Hauptspiegel des Riesenfernrohrs mit einer Lichtsammelfläche von zusammen 110 Quadratmetern befinden sich auf einer gemeinsamen Montierung. Die Fotomontage zeigt das Teleskop, wie es nach seiner Fertigstellung 2006 aussehen wird – gegenwärtig wird der zweite Hauptspiegel installiert.**

▷ aber auch hier nicht. Denn Astronomen können zwar mit ausgefeilten Messinstrumenten einen spektralen Fingerabdruck eines Sterns nehmen – wie er in seinem Innern tatsächlich aufgebaut ist, erschließt sich jedoch nicht unmittelbar. Gleichwohl wächst mit der Genauigkeit und dem Umfang der Messdaten unsere Wissensbasis, auf der wir unsere Modelle und Theorien aufbauen können. Das LBT als Vertreter einer neuen Teleskopgeneration wird die Forschung ein weites Stück voranbringen.

Es ist freilich ein steiniger Weg, die benötigten Fingerabdrücke zu sammeln. Der apparative Aufwand ist enorm. Um das anspruchsvolle Konzept des LBT realisieren zu können, haben sich Universitäten und Institutionen aus den USA, Italien und Deutschland zusammengeschlossen. Der deutsche Beitrag sichert den fünf beteiligten hiesigen Instituten wertvolle Beobachtungszeit an einem Observatorium in klimatisch günstiger Lage: Das Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg, das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching, das Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn, die Landessternwarte Heidelberg (jetzt Teil des 2005 gegründeten Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg) und das Astrophysikalische Institut Potsdam liefern die Instrumente für das LBT und bekommen dafür im Gegenzug ein Viertel der Beobachtungszeit zugeteilt.

In einem mehrere Jahre dauernden Prozess stellte das Steward-Observatorium der Universität von Arizona in Tucson die beiden Spiegel her. Sie sind nicht massiv wie frühere Spiegelkörper, sondern bestehen aus einem Wabenmuster von Glasstäben (Bild unten). Trotz ihres Durchmessers von 8,4 Metern sind sie mit je 16 Tonnen erheblich leichter als der berühmte 5-Meter-Spiegel des Palomar-Teleskops, der 40 Tonnen wiegt. Ihre Oberflächen sind auf 25 Nanometer genau poliert, also auf etwa ein Zwanzigstel der sichtbaren Lichtwellenlänge. Denkt man sich einen solchen Spiegel auf 35 Kilometer vergrößert, was der Ausdehnung Berlins entspricht, so würde keine Stelle seiner Oberfläche mehr als ein zehntel Millimeter von der Sollform abweichen.

Aktive und adaptive Optik

Derart präzise Flächen sind äußerst empfindlich. Deshalb wird die wabenförmige Glasstruktur während des Teleskopbetriebs thermisch und mechanisch aktiv unterstützt. Dies verhindert interne konvektive Luftströme, gleicht die Durchbiegung durch das eigene Gewicht aus und kompensiert auch noch die Windlast bei geöffnetem Kuppelspalt. Die Hochpräzisionsmechanik für die aktive Verformung der Spiegel hat das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik entwickelt und gebaut.

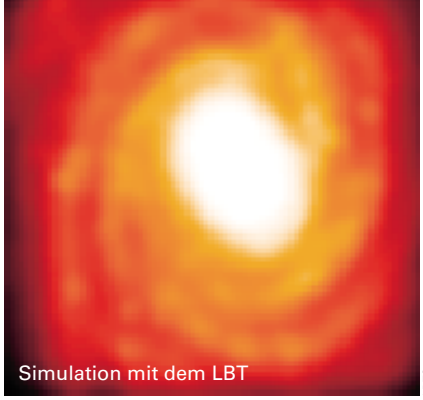
Zusätzlich zu dieser aktiven Optik wird das LBT mit einer neuartigen adaptiven Optik ausgestattet sein – einem optisch-elektronischen System, das die Verzerrungen des Bilds durch die Turbulenz der Erdatmosphäre misst und in Echtzeit korrigiert. Die Ursachen solcher Bildverzerrungen kann man sich folgendermaßen vorstellen: Ein typisches Turbulenzelement der Erdatmosphäre in zehn Kilometer Höhe hat einen Durchmesser von rund 20 Zentimetern und hält für etwa zehn Millisekunden seinen Brechungsindex mehr oder weniger konstant. In dieser Zeitspanne lässt es die einfallende Wellenfront – zum Beispiel das Licht eines Sterns – weit gehend undeformiert passieren. Mit einem Teleskop, dessen Durchmesser nicht größer ist als die 20 Zentimeter eines Turbulenzelements, könnte man also der Luftunruhe ein Schnippchen schlagen, wenn die aufgenommenen Bilder kürzer als zehn Millisekunden belichtet werden. Dann wäre die Auflösung der Bilder nur durch die Beugung der Lichtstrahlen im Fernrohr begrenzt (und somit nur von der Wellenlänge des Lichts und der Öffnung des Teleskops, dem wirksamen Durchmesser des Hauptspiegels, abhängig).

Im Gesichtsfeld eines Großteleskops liegen zwangsläufig viele Turbulenzelemente. Der Trick des LBT: Sensoren messen mit Hilfe des Lichts von Referenzsternen die Deformierung der Wellenfront im Gesichtsfeld, und zwar tausendmal pro Sekunde, wandeln sie in elektronische Signale um und geben diese an die beiden Sekundärspiegel des Teleskops weiter. Deren Oberflächen verkrümmen sich dann innerhalb weniger Millisekunden umgekehrt zur gemessenen Wellenfront und biegen diese wieder gerade. Eine solche adaptive Optik hilft auch unvermeidliche mechanische und optische Fehler des Teleskops zu kompensieren. Teile dieses Systems, die so genannten »acquisition, guiding & wavefront-sensing«-Einheiten, baut das Astrophysikalische Institut Potsdam.

Wenngleich sowohl die aktive als auch die adaptive Optik die Bildverzerrungen korrigieren und somit die LBT-Bilder schärfer machen, können sie das Auflösungsvermögen nicht über die Beu-

LBTO

◁ **Jeder der beiden Hauptspiegel hat einen Durchmesser von 8,4 Metern. Die Honigwabenstruktur des Glaskörpers – hier im bereits polierten, aber noch nicht verspiegelten Zustand – minimiert das Gewicht, gewährleistet aber eine hohe mechanische Steifigkeit.**



LBTO

Wie hier am Beispiel der Galaxie NGC 4535 demonstriert, wird das Large Binocular Telescope (LBT) feinere Details erkennen können als das Hubble-Weltraumteleskop (HST).

gungsbegrenzung eines einzelnen 8,4-Meter-Spiegels hinaus steigern. Es sei denn, das Licht beider Spiegel wird in einem gemeinsamen Fokus vereint. Genau aus diesen Überlegungen heraus hatten Nick Woolf und Roger Angel von der Universität von Arizona sowie Piero Salinari von der Sternwarte Arcetri (Italien) das Doppelfernrohr-Design mit zwei Spiegeln auf einer gemeinsamen Montierung entworfen.

Lucifer, Pepsi, Linc-Nirvana – Instrumente »made in Germany«

Die Außenkanten der beiden 8,4-Meter-Spiegel haben einen Abstand von 22,8 Metern. Das Auflösungsvermögen des LBT in Richtung der Verbindungslinie beider Spiegel entspricht somit demjenigen eines 22,8-Meter-Einzelspiegels. Im rechten Winkel dazu ist das Auflösungsvermögen »nur« das eines 8,4-Meter-Spiegels. Da die LBT-Optik aber auf einer so genannten alt-azimutalen Montierung aufgebaut ist (das Teleskop dreht sich in Horizontebene und in Höhe), führt die Verbindungslinie zwischen beiden Spiegeln im Lauf einer Nacht infolge der Erdrotation eine Drehung von bis zu 180 Grad relativ zum Himmel aus. Damit kann das LBT in einer einzigen Nacht eine ringförmige Apertur mit einem Außendurchmesser von 22,8 Metern und einer Ringstärke von 8,4 Metern simulieren. Um die erstaunlichen Kapazitäten der interferometrischen Strahlvereinigung nutzen zu können, werden zurzeit zwei komplementäre Instrumente gebaut – eines am Max-Planck-Institut für Astronomie, ein zweites am Steward-Observatorium der Universität von Arizona. Beide sollen 2009 »erstes Licht« sehen.

Bisher steht dem ersten LBT-Spiegel eine Primärfokuskamera (Large Binocular Camera, LBC) zur Verfügung – mit diesem in Italien gebauten Gerät entstand die Aufnahme von NGC 891. Die Primärfokuskamera bildet einen Himmelsausschnitt von der Größe des Vollmonds auf einem Mosaik von vier großen CCD-Detektoren ab. Weltweit einmalig ist ihre spektrale Empfindlichkeit im ultravioletten Licht: Die LBC vermag noch Objekte zu erkennen, von denen nur zwei Photonen pro Sekunde den Detektor erreichen. Im Jahr 2007 werden dann der erste adaptive Sekundärspiegel und der erste der beiden Multi Object Double Spectrographs (MODS) ihre Arbeit aufnehmen und optische Spektren von extrem lichtschwachen extragalaktischen Objekten ermöglichen.

An der Landessternwarte Heidelberg und den Max-Planck-Instituten für Astronomie und für extraterrestrische Physik entsteht zurzeit ein Multiobjekt-Spektrograph und Imager für den infraroten Spektralbereich von 1 bis 2,5 Mikrometer Wellenlänge. Von diesem Lucifer genannten Instrument (für »LBT near-infrared spectroscopic utility with camera and integrated field unit for extragalactic research«) wird es zwei Einheiten geben. Die erste soll 2007 nach Arizona geliefert werden und unter anderem Durchmusterungen von lichtschwachen Galaxien und Galaxienhaufen durchführen.

Der weltweit leistungsfähigste optische Spektrograph seiner Art wird ab 2008 Pepsi sein. Das »Potsdam echelle polarimetric and spectroscopic instrument« entsteht gegenwärtig am Astrophysikalischen Institut Potsdam. Pepsi wird im gesamten Wellenlängenbereich vom Ultravioletten bis zum nahen Infraroten mit höchster Auflösung einsetzbar sein. Damit können Lichtwellenlängen voneinander getrennt werden, die nur etwa einem Hundertstel eines Atomdurchmessers entsprechen. Dies erfordert eine besonders erschütterungsfreie Aufstellung der Spektrographenoptik, die andernfalls bereits durch winzige Luftdruckschwankungen, die von der differenziellen Mondanziehung (Gezeiten) herrühren, oder von der periodischen Brandung des Pazifiks an der kalifornischen Küste gestört werden würde. Pepsi wird deshalb in einem barometrisch und thermisch stabilisierten Behälter untergebracht. Helle Sterne kann Pepsi auf der sonnenabgewandten Himmelshälfte sogar am Tag beobachten. Die Polarimeter des Instruments erlauben erstmals Magnetfeldmessungen an sehr hellen Sternen mit einer Genauigkeit, wie sie bisher Untersuchungen der Sonne vorbehalten waren. Aber nicht nur Sterne, auch andere Himmelskörper werden im Visier von Pepsi sein: der aktive Jupitermond Io ebenso wie Quasare am Rand des sichtbaren Universums.

Erst die »LBT interferometric camera« mit dem »near-infrared visible adaptive interferometer for astronomy«, kurz Linc-Nirvana, wird ab 2009 das volle Auflösungsvermögen des LBT nutzen. Es sollen dann Details von nur einer hundertstel Bogensekunde abbildbar sein. Dann wird das LBT zehnmal schärfere Bilder liefern als das Hubble-Weltraumteleskop heute, und zwar auch von Objekten, die nur ein Dreißigstel so hell sind wie diejenigen, die Hubble noch nachzuweisen vermag.

Linc-Nirvana kombiniert zwei optische Verfahren. Linc bildet das Licht beider Teleskope in einem gemeinsamen Brennpunkt ab, ist also eine interferometrische Kamera. Nirvana muss Linc vorgeschaltet werden und beseitigt die Wellenfrontdeformationen durch verschiedene Schichten der Erdatmosphäre. Dabei muss die Weglänge der Photonen vom Hauptspiegel bis zum Detektor bei beiden Teleskopen exakt gleich sein. Linc-Nirvana wird derzeit federführend am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg gebaut.

Jagd auf extrasolare Planeten

Alle diese Instrumente werden sich in der nächsten Dekade einer Reihe von brennenden wissenschaftlichen Fragen zuwenden. Einer der Schwerpunkte wird die detaillierte Untersuchung von Sternen mit extrasolaren Planeten und möglicherweise deren direkter Nachweis mit Hilfe so genannter interferometrischer Koronographie sein. Könnten wir vielleicht sogar erste Hinweise auf Exoplaneten mit Atmosphären bekommen und ▷

FOTOMONTAGE: RAINER ARLT, ASTROPHYSIKALISCHES INSTITUT POTSDAM

Das Gebäude des Doppelspiegels ist etwa doppelt so hoch wie das Brandenburger Tor.

▷ damit indirekte Hinweise auf mögliches Leben? Aber auch nicht so spektakuläre Fragen wie diejenigen nach der Reionisation der Materie in der Frühzeit des Universums, nach der Natur der Dunklen Materie oder auch nach dem Vorhandensein von kosmischen Magnetfeldern und deren Rolle im kosmischen Geschehen werden das LBT über die nächste Dekade hinaus beschäftigen.

Als Michel Mayor und Didier Queloz von der Genfer Sternwarte 1995 den ersten extrasolaren Planeten entdeckten, wurde damit nicht nur ein lang gehegter Wunsch der Astronomen und Planetologen erfüllt, sondern auch die Frage wieder belebt: Sind wir tatsächlich allein im All? Das LBT wird diese Frage wohl nicht beantworten können, aber zumindest helfen, die Suche auf ein empirisches, wissenschaftliches Niveau zu heben. Dazu gehört zum Beispiel die Beobachtung, dass die Mehrheit der Sterne, die von Planeten umkreist werden, eine Überhäufigkeit von schweren Elementen in ihren Atmosphären zeigen. Kann es sein, dass in der Entstehungszeit die innersten, relativ metallreichen Planeten auf ihre Muttersterne stürzten und so die Chemie der Sternatmosphäre im Lauf der Zeit veränderten? Warum aber nicht bei der Sonne, die eine »normale Metallizität« zeigt? Alles nur Zufall? Messen wir falsch? Oder waren Materieverteilung und Drehimpulstransport in jenen prästellaren Scheiben, die zu den heute bekannten extrasolaren Planetensystemen führten, doch anders als im Sonnensystem? Spielte das Magnetfeld eine Rolle? Die Frage nach der Entstehung des Sonnensystems hat mit der Entdeckung extrasolarer Planeten jedenfalls einen bedeutenden Aufschwung erlebt. Noch verstehen wir die neuen Entdeckungen nicht, vor allem auch weil die momentan etwa 170 bekannten extrasolaren Systeme fast alle mit der so genannten Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt wurden und damit einer ungewollten Vorauswahl unterlagen.

Eine zweite Erde in 30 Lichtjahren Entfernung?

Mit dem LBT können Astronomen nun auch mit zwei weiteren, gänzlich unterschiedlichen Methoden nach extrasolaren Planeten suchen. Mit Hilfe der direkten Abbildung mit hoher Präzision (dem Zehntausendstel einer Bogensekunde) könnte die Reflexbewegung des Muttersterns direkt detektiert werden. Damit sollten alle jupiterähnlichen Planeten bis zu einer Entfernung von 300 Lichtjahren nachweisbar sein. Eine andere Methode ist die so genannte Nulling-Interferometrie oder interferometrische Koronographie. Die Grundidee besteht darin, das Licht eines Sterns, das von beiden Teleskopen auf der optischen Achse einfällt, miteinander in destruktive Interferenz zu bringen, also auszulöschen, gleichzeitig aber das Licht eines umkreisenden Planeten, das etwas neben der optischen Achse einfällt, in konstruktive Interferenz zu bringen, also zu verstärken. Bei einer Wellenlänge von 10 Mikrometern strahlt der Mutterstern aber immer noch etwa hunderttausend- bis zehnmillionenmal heller als der nachzuweisende Planet. Mit seinen 22,8 Meter Basislänge wird das LBT-Interferometer bei 10 Mikrometer eine Auflösung von 0,1 Bogensekunden haben. Damit sollte sich ein Planet von der Größe der Erde nachweisen lassen, wenn er einen sonnenähnlichen, bis zu 30 Lichtjahren entfernten Stern umkreist.

Eine Methode, um mehr über einen oder mehrere bereits bekannte Planeten herauszufinden, ist das so genannte Transit-Mapping. Dabei muss die Bahnebene des vermeintlichen Planeten so orientiert sein, dass von der Erde aus gesehen der Planet vor der Scheibe seines Muttersterns vorüberzieht – ähnlich wie bei dem Venustransit, der im Juni 2004 zu beobachten war. Die extrem hohe spektrale Auflösung von Pepsi könnte es dann ermöglichen, das während des Transits abgeblockte Licht des Sterns in dessen Absorptionslinienprofil nachzuweisen. Dazu verwenden Astronomen eine Methode, die der Computertomografie in der Medizin nicht unähnlich ist. Wenn ein Stern rotiert, enthalten die Profile seiner Spektrallinien eine eindimensionale Abbildung seiner Oberfläche. Mit Hilfe einer Zeitserie solcher Linienprofile lässt sich ein künstliches »Bild« seiner Oberfläche errechnen. Das fehlende Sternlicht – geblockt durch die winzige Planetenscheibe – könnte so über einen bestimmten Zeitraum hinweg sogar kartografiert werden. Bislang sind zwar nur fünf Planetensysteme mit Hilfe der Transitmethode entdeckt worden, doch beteiligen sich mindestens 20 Teleskope weltweit an der Suche nach weiteren Transits.

Weitere Schwerpunkte des LBT werden die Erforschung der Struktur des frühen Universums, die Rolle von galaktischen Schwarzen Löchern und die Entstehung der ersten Sterne vor rund 13 Milliarden Jahren sein. Die Nasa-Sonde WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) datierte den Zeitpunkt, ab dem sich die schnellen Elektronen im frühen Universum an die freien Protonen hefteten, also erstmals Atome bildeten, auf etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall. Dadurch klarte es im Univer-

sum plötzlich auf, denn nach der Bildung von Wasserstoff- und Heliumatomen konnten sich die Photonen fortan ungehindert von der Materie ausbreiten.

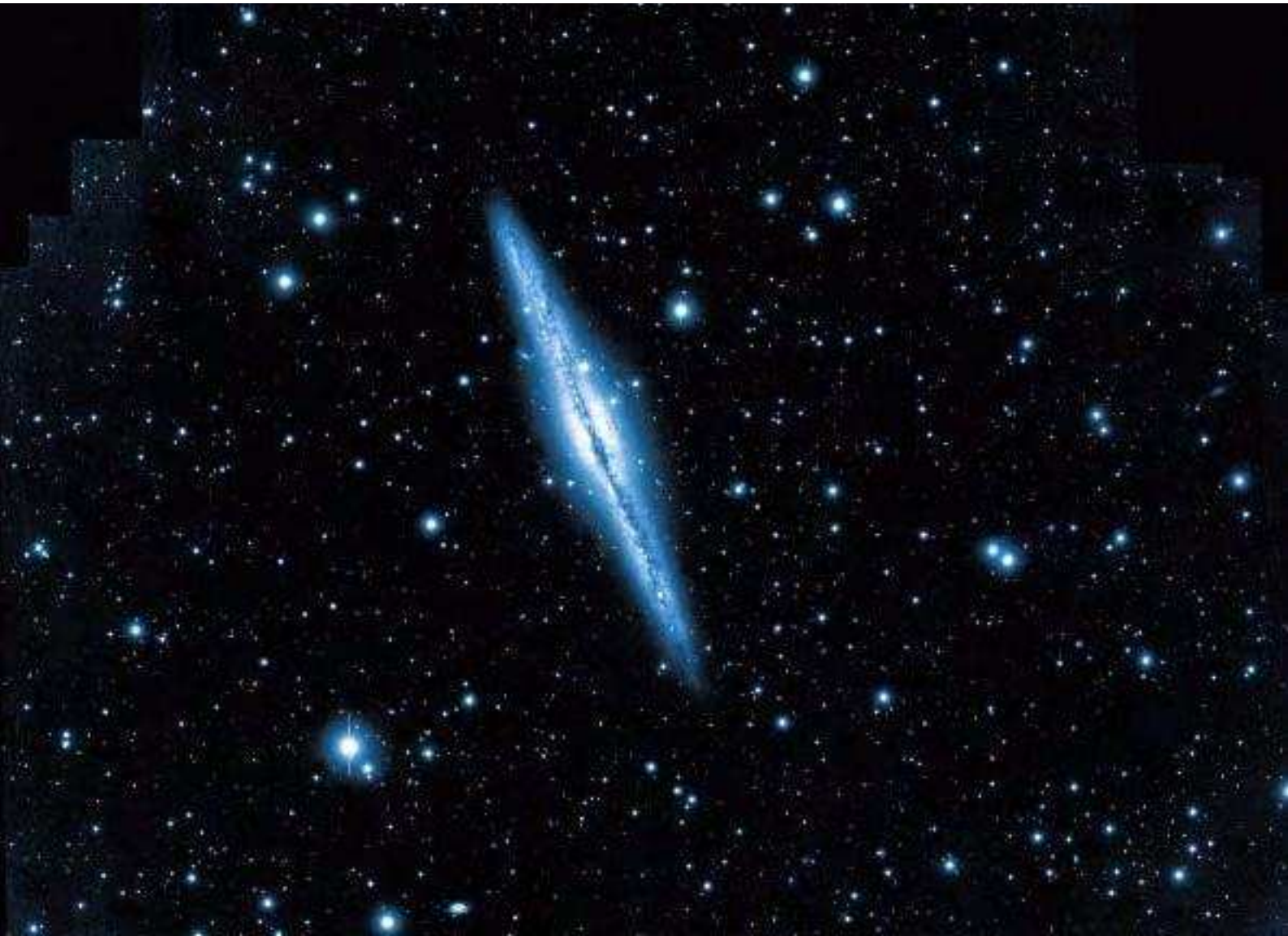
WMAP fand auch heraus, dass die Ionisation des intergalaktischen Gases nur etwa 200 Millionen Jahre nach dem Urknall erfolgt sein musste. Aber um etwa Strukturen wie Galaxien und ihre ersten Riesensterne zu formen, reichten die neu gebildeten Atome bei Weitem nicht aus: Es gab noch keine so genannten Metalle, also Elemente schwerer als Wasserstoff, Helium und Lithium.

Dazu bedurfte es einer unsichtbaren Dunklen Materie, die wir immer noch fieberhaft zu finden versuchen. Wie uns WMAP lehrte, macht die gewöhnliche Materie – Protonen und Neutronen – nur vier Prozent der Gesamtmasse des Universums aus, der Rest ist Dunkle Materie und Dunkle Energie. Womöglich entstanden die ersten Sterne also anders, als wir es heute in Sternentstehungsregionen beobachten können. Gibt es davon noch Reste oder irgendwelche anderen Hinweise? Haben etwa die extrem massereichen Schwarzen Löcher in Galaxienkernen, wie etwa das drei Millionen Sonnenmassen schwere Schwarze Loch in unserer eigenen Galaxis, dem Milchstraßensystem, etwas mit den ersten Sternen zu tun? Vom LBT erhoffen sich Astronomen Antworten auf solche Fragen.

Magnetischer Fluss – das ist Feldstärke multipliziert mit der Fläche, die sie durchdringt – ist eine physikalische Erhaltungsgröße. Einmal generiert, verschwindet er nicht mehr, da er dem Energieerhaltungssatz unterliegt, heute genauso wie am Anfang des Universums. Magnetfelder spielen bei einer Vielzahl astronomischer Phänomene eine Rolle, etwa bei Akkretionsscheiben, rotierenden Materiewirbeln, die um manche Sterne ebenso anzutreffen sind wie bei Schwarzen Löchern. Wir müssen uns darum zunehmend auch die Frage nach dem »Woher« der kosmischen Magnetfelder stellen. Ganz ähnlich wie bei den extrem massereichen Schwarzen Löchern in Galaxienkernen: War zuerst die Galaxie mit ihren Sternen da oder das Schwarze Loch? Hier könnten neue Beobachtungen Aufschluss bringen.

Am einfachsten lassen sich Magnetfelder bei hellen Sternen beobachten. Insbesondere das Magnetfeld unserer Sonne ist detailliert untersucht und bietet ein einzigartiges magnetohydrodynamisches Labor mit Dimensionen von mehreren Millionen Kilometern. Das globale solare Feld ist zwar nur etwa 10 Gauß stark (das Erdmagnetfeld sogar nur 0,5 Gauß), doch wenn die Sonne ▷

Noch »einäugig« fotografierte das LBT im Oktober 2005 die Spiralgalaxie NGC 891 im Sternbild Andromeda. Das Sternsystem ist zufällig so geneigt, dass wir direkt in die Scheibenebene blicken. Auch ohne adaptive Optik zeigt die Aufnahme bereits Feindetails der dunklen Gas- und Staubwolken mit einer Auflösung von 0,8 Bogensekunden.



▷ am Ende ihrer Entwicklung zu einem etwa 5000 Kilometer kleinen Weißen Zwerg schrumpft – wie alle sonnenähnlichen Sterne –, wird sich dieses Feld an der Sternoberfläche millionenfach verstärkt haben, da der Fluss erhalten bleibt. Welchen Einfluss hat er dann auf den umgebenden Planetarischen Nebel, aus dessen Material letztlich wieder neue Sterne geboren werden?

Neutronensterne und Schwarze Löcher

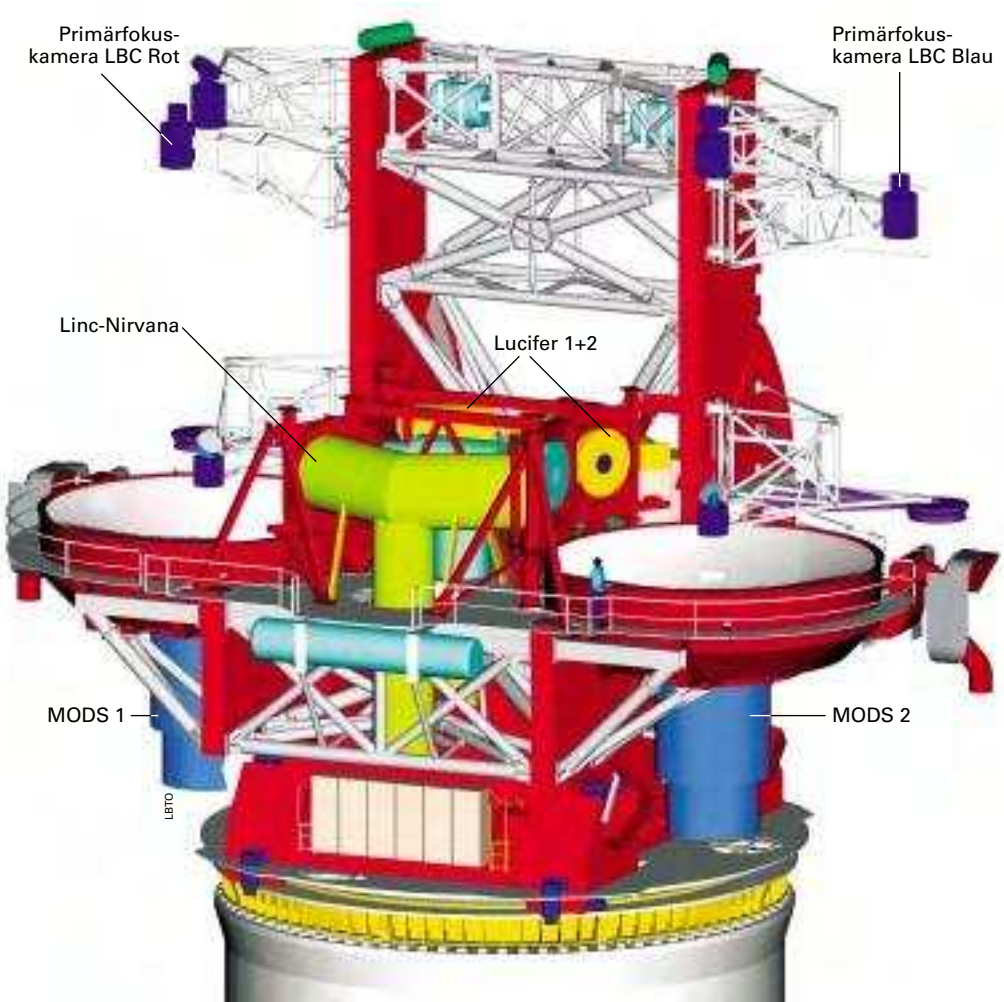
Manche Supernovatypen bringen durch ihre Implosion einen rasch rotierenden Neutronenstern hervor, mit Oberflächendichten von 10^8 Kilogramm pro Kubikmeter (entsprechend etwa 100 Kilogramm pro gehäuftem Teelöffel) und Dichten mit bis zu 10^{20} Kilogramm pro Kubikmeter (etwa 100 Milliarden Tonnen pro Teelöffel). Als Pulsar bestrahlt er danach die explodierte Hülle des Sterns und produziert damit einen leuchtenden Gasnebel. Der Krebsnebel im Sternbild Stier und dessen zentraler Neutronenstern sind das bekannteste Beispiel eines Supernova-Überrests (Bild auf der rechten Seite).

Da auch bei Supernovae der magnetische Fluss erhalten bleiben muss, erwartet man bei mittleren Radien von nur 30 Kilometern eine Magnetfeldstärke an der Oberfläche von etwa 10^5 bis 10^9 Tesla. Solche Werte wurden bei einigen Neutronensternen auch bereits beobachtet. Neutronensterne sollten im Röntgenbereich mindestens 1000-mal so hell strahlen wie im optischen Wellenlängenbereich. Eine zunehmende Anzahl von so genannten isolierten Neutronensternen (das sind Einzelgänger, die weder im Zentrum eines Supernova-Überrests noch in einem Doppelsternsystem gebunden sind) leuchten aber im Optischen unerwartet hell. Hatte diese Population von Neutronensternen etwa zusätzliche Masse aus der Umgebung akkretiert, sind sie also nach der Supernova-Explosion wie riesige Staubsauger durch die Galaxis gefegt? Deren Anzahl in der Galaxis schätzen die Astronomen auf bis zu eine Milliarde. Somit könnten sie also mehr als nur ein exotisches Phänomen sein. Oder ist es doch der natürliche ohmsche Zerfall des Magnetfelds, der den Neutronenstern weiterheizt? Das LBT mag die Antwort bringen.

Noch wesentlich massereichere Sterne beenden ihr reguläres Dasein als nur wenige Kilometer großes Schwarzes Loch. Auch bei der Entstehung dieser wohl exotischsten aller Himmelsobjekte müssen Drehimpuls und magnetischer Fluss erhalten bleiben. Es bilden sich gigantische Akkretionsscheiben, die von relativistischen Effekten und der Emission energiereicher Röntgen- und Gammastrahlung geprägt werden. Aber nach einiger Zeit ist die explodierte Hülle des Sterns vollständig hinter dem Ereignishorizont verschwunden und isolierte stellare Schwarze Löcher machen sich nur noch bemerkbar, wenn sie miteinander kollidieren – dann werden Gravitationswellen abgestrahlt –, oder wenn ein anderer Stern ihren Weg kreuzt und zerrissen wird. Es gibt Hinweise, dass es in der Frühzeit unserer Galaxis mehr massereiche Sterne gab als heute und damit eine größere Entstehungsrate von stellaren Schwarzen Löchern. Damit müsste es heute aber viele frei fliegende »isolierte« Schwarze Löcher (und wohl auch Neutronensterne) geben. Hinweise auf diese Einzelgänger erhoffen sich Astronomen von einer umfassenden Suche mit der neuen Large Binocular Camera.

Die große Lichtsammelfläche des LBT ermöglicht eventuell eine direkte Messung der Magnetosphäre eines Neutronensterns oder vielleicht sogar eines stellaren Schwarzen Lochs, dann aber nur, wenn es sich in einem Doppelsternsystem befindet, wie zum Beispiel bei dem blauen Riesenstern SS 433. Das Licht des optischen Begleiters muss, wenn er von uns aus gesehen hinter dem Neutronenstern steht, die Magnetosphäre des Neutronensterns passieren. Neben dem eigenen Absorptions- beziehungsweise Emissionsspektrum wird es auch die Magnetfeldsignatur des Neutronensterns aufweisen. Das LBT wird auf absehbare Zeit das einzige Teleskop sein, das Spektren mit genügender Präzision und Zeitauflösung aufnehmen kann, um daraus die Feldgeometrie des Neutronensterns isolieren zu können.

Auch bei der Sternentstehung und womöglich in der weiteren Sternentwicklung scheint das galaktische Magnetfeld eine noch unbekannte Rolle zu



Die meisten Instrumente sind zusammen mit der Teleskopoptik auf der gemeinsamen Montierung untergebracht. Der Spektrograph Pepsi befindet sich in einem separaten Schutzraum unterhalb der Montierung.

spielen. Obwohl das heute beobachtete Feld der Sonne von einem Dynamomechanismus in ihrem Innern stammt, benötigt eben genau dieser Dynamo ein Saatfeld, um überhaupt anlaufen zu können. So wie man mit dem Fahrrad zuerst einmal fahren muss, um mit dessen Dynamo Licht zu erzeugen. Bei Sternen sorgt deren eigene Rotation dafür.

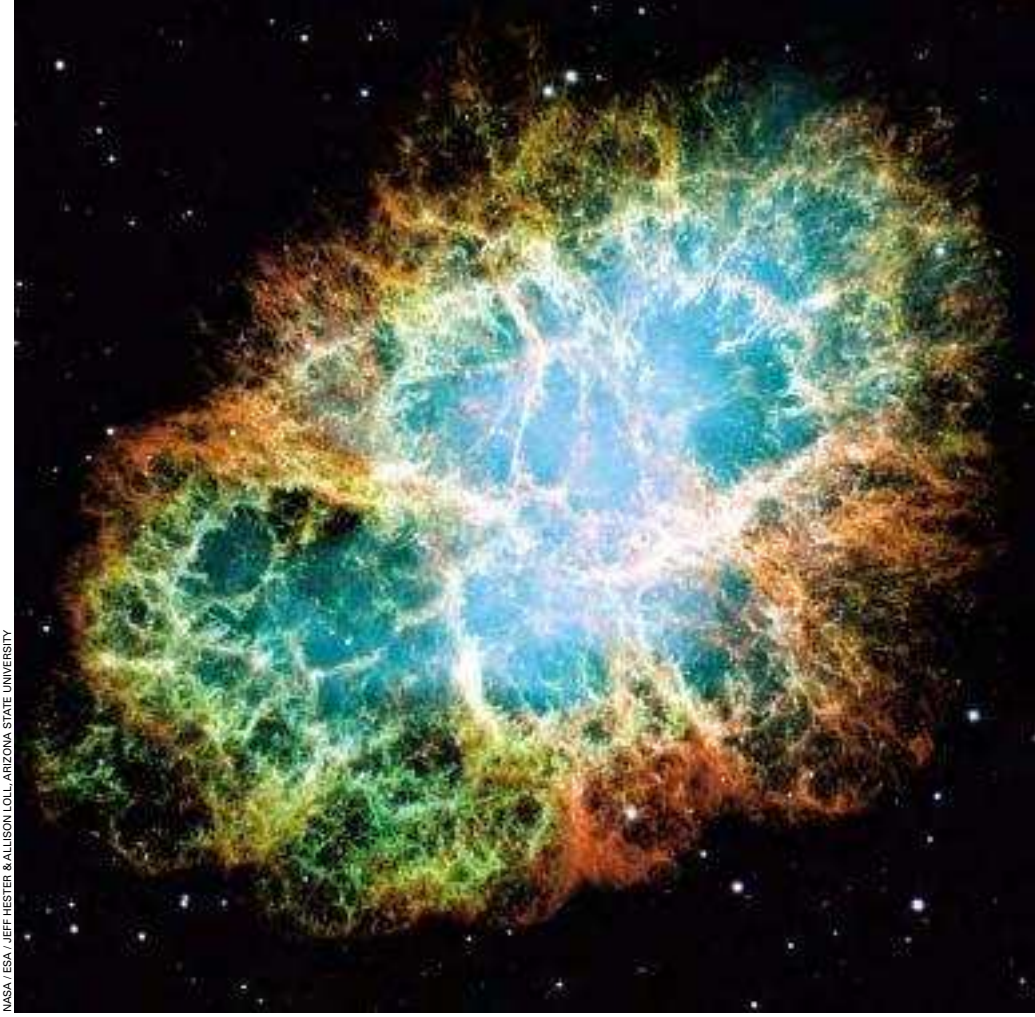
Wir wissen schon seit den 1930er Jahren, dass unsere Galaxis ein ausgedehntes Magnetfeld aufweist. Radioteleskope haben Magnetfelder sogar in anderen Galaxien kartografiert. Wir wissen aber noch immer nicht, woher diese Felder kommen beziehungsweise ob es sich um ein dynamogeneriertes oder um ein primordiales Feld aus der Frühzeit des Universums handelt. Magnetfeldmessungen des interstellaren Mediums mit Hilfe von Hintergrundsternen in einem repräsentativen Volumen unserer Galaxie könnten auch über eine mögliche magnetische Vernetzung unserer Galaxie Auskunft geben. Hat diese »Vernetzung« etwa die galaktische und womöglich kosmologische Entwicklung beeinflusst?

Mit dem LBT können wir noch einen Schritt weiter gehen. Anhand von Quasaren als Hintergrundobjekte anstelle von Sternen können wir mit dem Pepsi-Spektrographen auch im Spektrum des intergalaktischen Gases nach Magnetfeldsignaturen suchen. Obwohl postuliert, ist es noch nicht gelungen, das intergalaktische Magnetfeld nachzuweisen. Falls es existiert, könnte dies weit reichende Konsequenzen für die heutige Vorstellung eines inflationären Universums haben. Die Inflation selbst könnte durch die Rückstellkraft des Magnetfelds eventuell sogar gedämpft worden sein, was uns zwingen würde, unsere kosmologischen Modelle zu modifizieren.

Vorreiter neuer Teleskopgenerationen

Gammastrahlenausbrüche sind wahrscheinlich die energiereichsten Phänomene des Universums. Sie strahlen für Sekunden hundert- bis tausendmal mehr Energie ab als eine typische Supernova. Bislang wurden über 2000 derartige Ereignisse registriert. Wir kennen aber noch keinen Mechanismus, der die enormen Energien erzeugen könnte. Zumindest wissen wir dank der optischen Detektion solcher Energieausbrüche mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte und mit anderen Großteleskopen, dass sie in kosmologischen Distanzen erfolgen und nicht etwa in unserem eigenen Milchstraßensystem oder in dessen Umgebung. Würde ein typischer Gammastrahlenausbruch in der uns benachbarten, rund zwei Millionen Lichtjahre entfernten Andromedagalaxie auftreten, erschiene er uns so hell wie der Vollmond. Geschähe dies hingegen im Orionnebel, der etwa 1500 Lichtjahre von uns entfernt ist, strahlte eine zweite Sonne am irdischen Himmel. Ein Erfolg wäre es, wenn das LBT Spektren solcher Ausbrüche aufnehmen würde und man daraus erste Hinweise auf deren Energieerzeugungsmechanismus erhielte. Das LBT erfüllt zumindest die beiden Voraussetzungen dazu: Es ist mit seinen 110 Quadratmetern Lichtsammelfläche groß genug und es vermag innerhalb von Minuten auf ein derartiges Ereignis zu reagieren.

Die Liste der Astronomenwünsche nach neuen und immer präziseren Beobachtungen ist noch lang und wird sehr wahrscheinlich mit der Zeit noch länger. Denn eine Antwort wirft in der Astrophysik in der Regel zwei weitere Fragen auf. Ausgelegt ist der Betrieb des LBT auf 20 bis 30 Jahre. Danach, so die Pläne, wird es durch mehrere 30- bis 100-Meter-Teleskope abgelöst. ◁



NASA / ESA / JEFF HESTER & ALLISON LOLL, ARIZONA STATE UNIVERSITY

Supernova-Überreste wie der bekannte Krebsnebel gehören zu den Himmelsobjekten, von denen die Astronomen durch das LBT neue Erkenntnisse erwarten.

Klaus G. Strassmeier ist Direktor am Astrophysikalischen Institut Potsdam (AIP), einer der fünf deutschen LBT-Partner und auch älteste Sternwarte Deutschlands, sowie Professor für Astrophysik an der Universität Potsdam. Er ist zudem »Principal Investigator« des Spektralpolarimeters Pepsi. Seine fachlichen Interessen umfassen kosmische Magnetfelder, die »Solar-Stellar Connection«, robotische Teleskope, Dopplertomografie und hochauflösende Spektroskopie.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Einweihung des Large Binocular Telescopes. Von Jakob Staude in: Sterne und Weltraum, November 2004, S. 16

Dem Seeing ein Schnippchen schlagen. Von Stefan Hippler und Markus Kasper in: Sterne und Weltraum, Oktober 2004, S. 32

Das Large Binocular Telescope. Von Klaus G. Strassmeier in: Sterne und Weltraum, Mai 2003, S. 30

Richtfest für das LBT. Von Thomas Bührke in: Sterne und Weltraum, September 2001, S. 726

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Hirntod und Wachkoma

Mit dem medizinisch-technologischen Fortschritt wandelte sich das Todeskonzept. Ärzte und Gesellschaft mussten die klassische Diagnose, die sich auf Herz- und Atemstillstand konzentrierte, zu einer neurozentrischen umgestalten. Trotz augenscheinlichem Konsens zum Hirntod als Todesdefinition tauchen immer wieder ethische, moralische und religiöse Bedenken auf. Unbehagen besteht etwa, die Definition des Hirntodes könnte auf das irreversible Wachkoma ausgedehnt werden oder die Kriterien wären dahingehend formuliert, Organtransplantationen zu erleichtern.

nature REVIEWS NEUROSCIENCE

Auf den folgenden Seiten präsentieren wir einen übersetzten Originalbeitrag aus Nature Reviews Neuroscience, Bd. 6, November 2005, S. 899.

Alle Indexzahlen verweisen auf die Referenzen in der Literaturliste, zu finden unter www.spektrum.de/hirntod.

Von Steven Laureys

Haben wir das Recht, eine [lebenserhaltende] Therapie anhand von Kriterien zu beenden, welche die Grenze zwischen Leben und Tod zu kennen vorgeben?

P. MOLLARET UND M. GOULON 1959[1]

Ich denke, nur ein sehr kühner Mensch würde es wagen, Tod zu definieren.

H. K. BEECHER 1970[2]

Seit jeher bemühen sich Gesellschaft und Medizin um die Definition des Todes und seine Feststellung (Kasten S. 66). Die alten Ägypter und Griechen glaubten, das Herz bringe die Lebenskraft hervor; das Fehlen des Herzschlags galt daher als wichtigstes Todeszeichen.[3] Den irreversiblen Verlust der Hirnfunktion als gleichbedeutend mit Tod anzusehen, erwog erstmals Moses Maimonides (1135–1204), der herausragendste Gelehrte des mittelalterlichen Judentums: Die krampfhaften Zuckungen von Enthaupteten seien nicht als Lebenszeichen zu werten, da nichts daran auf das Vorhandensein einer zentralen Kontrolle hinwiese.[4] Erst viel später – mit der Erfindung des Überdruckbeatmungsgeräts durch Björn Ibsen in den 1950ern und mit der weiten Verbreitung der High-Tech-Intensivmedizin in den 1960ern – ließ sich die Herz-Atemfunktion wirklich von der Hirnfunktion trennen. Dank künstlicher Beatmung konnte man nun die Herz-Kreislauf-Tätigkeit schwer hirngeschädigter Patienten provisorisch aufrechterhalten. Zustände mit derartig tiefer Bewusstlosigkeit waren etwas nie Dagewesenes, da solche Patienten sonst alle sogleich an Atemstillstand starben.

Die ersten Schritte zu einer neurozentrischen Definition des Todes gingen von Europäern aus.[5,6] Die französischen Neurologen Mollaret und Goulon diskutierten 1959 die klinischen, elektrophysiologischen und ethischen Aspekte des »Coma dépassé«, wie sie es nannten.[1] Dieses unumkehrbare Koma wurde später als Hirntod bekannt. Leider erschien ihr Artikel auf Französisch, sodass er international kaum Beachtung fand.

1968 definierte die Ad-hoc-Kommission der Harvard Medical School – zehn Mediziner, ein Theologe, ein Jurist und ein Wissenschaftshistoriker – Tod als irreversibles Koma.[7] Der Report, ein Meilenstein, »eröffnete neue juristische Felder und stellte Theologen und Ethiker vor neuartige und besondere Probleme ... Er machte aus Ärzten Juristen, aus Juristen Ärzte und aus beiden Philosophen«.[8] Einige Jahre später zeigten neuropathologische Untersuchungen, dass für den Hirntod eine Schädigung des Stammhirns entscheidend ist.[9] So wurde das Konzept des Stammhirntodes eingeführt,[10] dementsprechend definierten englische Ärzte den Hirntod als vollständigen irreversiblen Verlust der Stammhirnfunktion.[11,12] »Ist der Hirnstamm tot, dann auch das Gehirn, und ist das Gehirn tot, dann auch die Person.«[10]

Der tragische Tod der US-Amerikanerin Terri Schiavo, die von Aktivisten für das »Recht auf Leben« oder für das »Recht zu Sterben« gleichermaßen instrumentalisiert wurde, illustrierte erst kürzlich der Welt, welche Problematik in dieser Hinsicht das Wachkoma umgibt.[13-15] Viele Kommentatoren, die sich fachlich nicht auskannten, bezeichneten Schiavos Zustand fälschlich als hirntot oder großhirntot. Ihr Grabstein trägt die Inschrift »Hingeschieden von dieser Welt am 25. Februar 1990«. Dies war der Tag, an dem sie ihren Hirnschaden erlitt (dieser war jedoch nur partiell und sie daher auch nicht tot). Erst am 31. März 2005 starb ihr Gehirn ganz ab und ihr Herz hörte auf zu schlagen.

Das breite Anliegen dieses Artikels sind die medizinischen, philosophischen, juristischen und ethischen Aspekte bei der Festlegung des Todes. Die drei existierenden Varianten neurozentrischer Definition beziehen sich entweder auf das gesamte Gehirn, den Hirnstamm oder die Großhirnrinde (den Neocortex). Bisher haben jedoch nur die beiden ersten eine anerkannte medizinische Basis. Nach der dritten, der bewusstseins- und persönlichkeitsbezogenen neocorticalen Definition, gelten auch Wachkomapatienten als tot. Dieser Artikel vertritt nun mit Nachdruck, dass Hirntod mit Tod gleichzusetzen ist, und beleuchtet die Unterschiede zum Wachkoma. Ferner argumentiert er, dass sich für eine Einführung der neocorticalen Definition des Todes keine verlässlichen anatomischen Kriterien oder klinischen Tests heranziehen lassen. Schließlich erörtert er kurz die juristischen und ethischen Aspekte des Todes und der letzten Phasen des Lebens.

Tod des Gehirns gleich Tod des Menschen

Beim Hirntod handelt es sich um den nach neurologischen Kriterien festgestellten menschlichen Tod. Ein allerdings unglücklich gewählter Begriff, suggeriert er doch, es gäbe zwei Arten des Todes: den »normalen« und den Hirntod.[4] Tatsächlich gibt es jedoch nur einen Tod, dessen Eintreten auf zweierlei Art bestimmt werden kann – anhand kardiorespiratorischer oder anhand neurologischer Kriterien. Das Missverständnis dürfte die Verwirrung in der Öffentlich-

keit, aber auch in Fachkreisen großenteils erklären. Bernat und seine Kollegen unterscheiden drei Ebenen der Diskussion: die Definition oder das Konzept des Todes (ein philosophischer Aspekt), seine anatomischen Kriterien (ein philosophisch-medizinischer Aspekt) und die praktischen Tests – klinische sowie Zusatzuntersuchungen – zur Feststellung des Todes (ein medizinischer Aspekt).[16]

Konzept des Todes. »Der irreversible Ausfall der kritischen Funktionen des Organismus als Ganzem«, so lautet die derzeit am breitesten akzeptierte Definition des Todes.[17] Der »Organismus als Ganzes« ist ein alter Begriff der theoretischen Biologie.[18] Er bezieht sich auf die funktionelle Unversehrtheit und Ganzheitlichkeit des Lebewesens, das mehr ist als die Summe seiner Teile. Zugleich schließt er die Vorstellung eines kritischen Systems mit ein.[19] Kritische Funktionen sind solche, ohne die der Organismus als Ganzes nicht überleben kann. Dazu zählen Atmung, Blutkreislauf, neuroendokrine Regulation, Homöostase und Bewusstsein. Tod ist definiert als irreversibler Verlust all dieser Funktionen. Die ermüdende Kontroverse, ob es sich dabei um einen Prozess[20] oder um ein Ereignis[21] handelt, führt offenbar zu keiner Lösung (Grafik S. 65).

In diesem Beitrag wird der Tod als ein diskontinuierliches Ereignis betrachtet (rein linguistisch lässt er sich nur als Ereignis verstehen[22]), das den kontinuierlichen Prozess des Sterbens vom nachfolgenden Zerfall des Körpers scheidet. Der radikale Übergang vom Leben zum Tod verläuft nach einer jüngeren Hypothese als superkritische Hopf-Verzweigung (diese verkörpert eine Kombination von Stetigkeit und Unstetigkeit, die aus der Chaostheorie und der Theorie dynamischer Systeme bekannt ist).[23] Ähnliche Unstetigkeiten haben Dehaene und Changeux zwischen Bewusstsein und Bewusstlosigkeit vorgeschlagen.[24]

Die neurozentrische Definition des menschlichen Todes existiert in drei Varianten, die sich jeweils auf Gesamtgehirn, Hirnstamm oder Neocortex (vereinfacht Großhirn) beziehen. Ganzhirn- wie auch Hirnstammtod sind beide definiert als irreversibles Ende des Organismus als Ganzem, unterscheiden sich jedoch in ihrer anatomischen Interpretation. Viele der Hirnregionen, die über dem so genannten Kleinhirnzelt liegen (wie Neocortex, Thalamus und Basalganglien), lassen sich bei einem Komapatienten nicht präzise auf ihre klinische Funktion prüfen. Die meisten am Krankenbett durchführbaren Test auf Hirntod (wie Prüfen von Hirnnervenreflexen und Spontanatmung) erfassen daher direkt nur die Hirnstammfunktionen.[4] Dagegen steht der bereits in der Frühphase der Debatte vorgeschlagene Großhirntod[25] für ein fundamental anderes Konzept: den Tod als irreversiblen Verlust des Bewusstseins und der Fähigkeit zur sozialen Interaktion. Den Befürwortern dieser bewusstseins- oder persönlichkeitszentrierten Definition gelten Patienten im dauernden Wachkoma und anencephale Neugeborene (sie besitzen nur ein Hirnrudiment) als tot.

Einige Ärzte,[26] Philosophen[27] und ultrakonservative katholische Theologen[28] lehnen die neurozentrische Definition ab und favorisieren eine, die auf dem irreversiblen Kreislaufstillstand basiert. Alan Shewmon, der überzeugendste Verfechter dieser Richtung, stützt seine Auffassung auf zwei Argumentationslinien. Zunächst einmal sei das Gehirn nur eines unter mehreren gleich wichtigen Organen und verdiene keinen Sonderstatus beim Feststellen des Todes, da sich seine körperlichen integrativen und homöostatischen Leistungen in ihrer Form qualitativ nicht von denen des Rückenmarks unterschieden.[29] Seiner Ansicht nach besitzt der lebende Organismus keinen Integrator, sondern Integration – eine holistische Eigenschaft, die sich von der wechselseitigen Interaktion aller Teile ableitet. Dann führte er mindestens fünfzig bedenkenswerte Fälle von hirntoten Kindern und Erwachsenen an, deren Kreislauffunktionen unter Maximaltherapie für viele Monate aufrechterhalten werden konnten.[30] Darüber hinaus gab es hirntote Schwangere, für die um Fortsetzung intensivmedizinischer Maßnahmen ersucht wurde, bis der Fetus reif genug war, um außerhalb des Mutterleibs zu überleben.[31-34] Beim außergewöhnlichsten derartigen Fall gelang der Erhalt einer hirntoten Patientin von der 17. bis zur 32. Schwangerschaftswoche.[32] Anhand dieser Fälle argumentiert Shewmon, das neurozentrische Todeskonzept laufe der Intuition zuwider, denn wie sollte ein toter Körper Funktionen innerer Organe über längere Zeit unterhalten können, wie sollte er wachsen und gar in seinem Inneren ein Kind heranreifen lassen?[30]

Was das Integrations-Regulationsvermögen anbelangt, so hielt Bernat[4] entgegen, die auf Kreislaufausfall basierende Definition werfe das umgekehrte Problem auf wie die auf Großhirnausfall basierende Formulierung: Letztere schafft ein Kriterium, das notwendig, aber nicht hinreichend für den Tod ist, Erstere aber eines, das hinreichend, aber nicht notwendig dafür ist.[35] Die homöostatischen regulatorischen Leistungen des Gehirns stellen nicht den einzigen Beleg für ein Funktionieren ▷

Kriterien für Hirntod

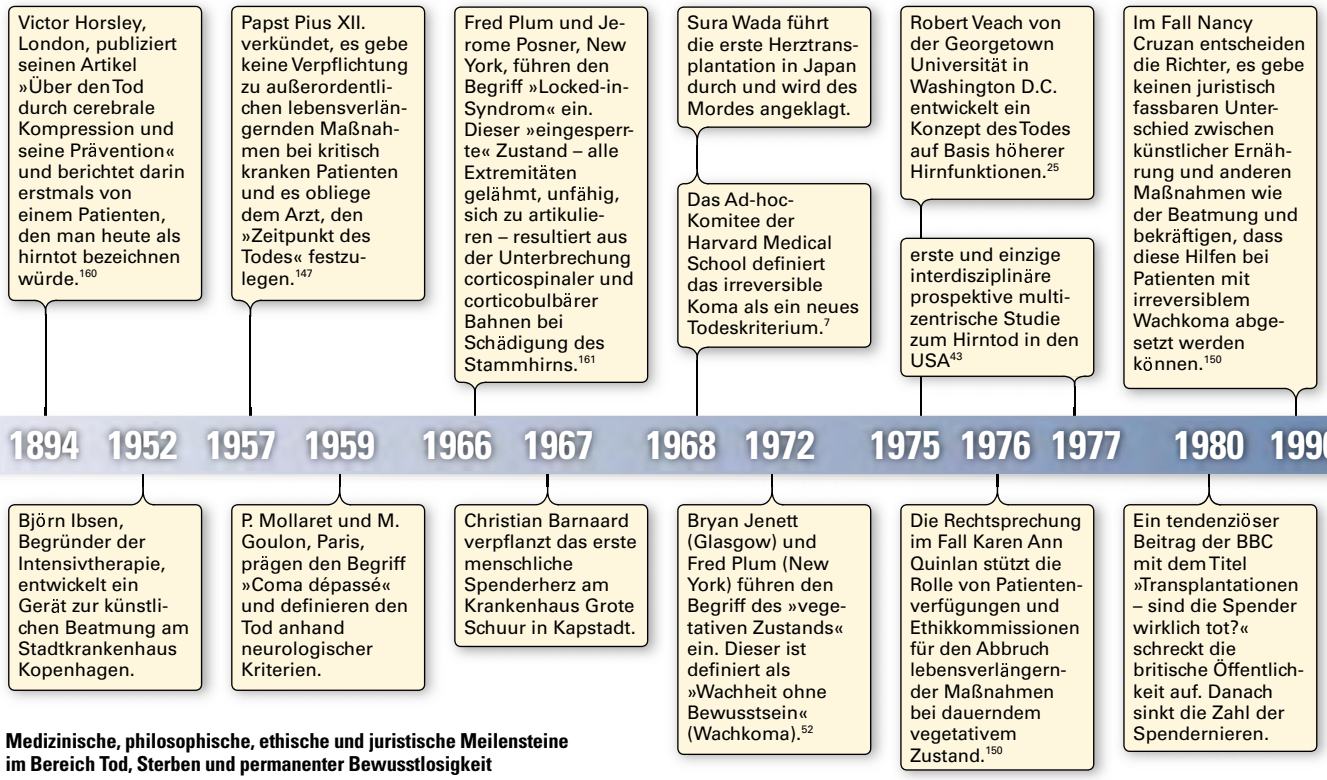
Diese hier entstammen den Richtlinien der American Academy of Neurology[45]

- Nachweis des Komas
- Hinweise auf die Ursache des Komas
- Abwesenheit von Störfaktoren wie Unterkühlung, Medikamente oder Entgleisungen im Elektrolyt- und Hormonhaushalt
- Fehlen der Stammhirnreflexe
- Fehlen motorischer Reaktionen
- Fehlen der Spontanatmung
- Wiederholung der Untersuchung nach sechs Stunden, wobei dieses Intervall als willkürlich gewählt angesehen wird
- bestätigende Laboruntersuchungen nur erforderlich, wenn einzelne Komponenten der klinischen Untersuchung nicht verlässlich zu beurteilen sind

Kriterien für Wachkoma

Sie umfassen die Richtlinien der US Multi-Society Task Force on Vegetative State[53]

- keine Anzeichen von Gewahrsein seiner selbst oder der Umgebung, keine Fähigkeit zur Interaktion
- keine Anzeichen für anhaltende, reproduzierbare, zielgerichtete oder willentliche Verhaltensreaktionen auf visuelle, akustische und taktile oder Schmerzreize
- keine Anzeichen von Sprachverständnis oder sprachlichem Ausdruck
- intermittierende Wachphasen durch das Vorhandensein eines Schlaf-Wach-Zyklus
- ausreichend erhaltene autonome Hypothalamus- und Stammhirnfunktionen, die ein Überleben mit medizinischer und pflegerischer Unterstützung erlauben
- Stuhl- und Harninkontinenz
- unterschiedlich erhaltene Hirn- und Rückenmarksreflexe



Medizinische, philosophische, ethische und juristische Meilensteine im Bereich Tod, Sterben und permanenter Bewusstlosigkeit

▷ des Organismus als Ganzem dar. Wie gesagt sind Herztätigkeit, Spontanatmung und Bewusstsein ebenfalls kritische Funktionen. Was die Ausnahme »chronisch« Hirntoter anbelangt, so zeige das nur an, dass »der physische Zerfall bloß bis zum Versagen des Kreislaufs verzögert wurde«[36] durch den heroischen Einsatz moderner Intensivmedizin – »ein Beispiel dafür, was Medizin und Technik heute leisten können, aber nicht leisten sollten«.[37]

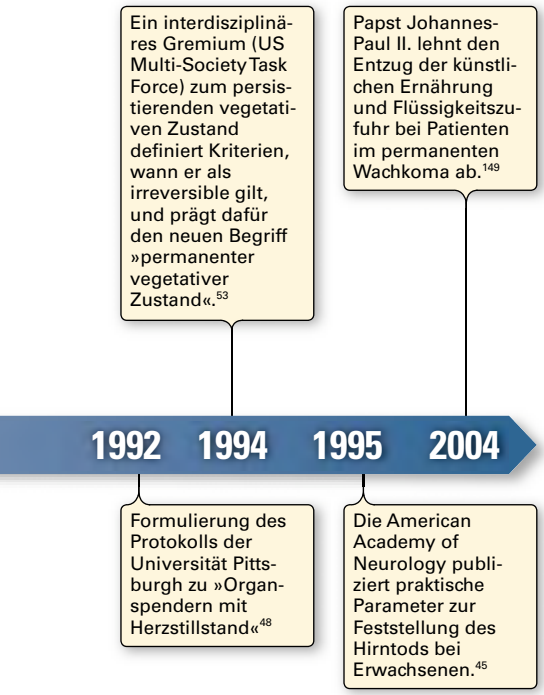
Der Hirntod kennzeichnet den Tod nicht deshalb, weil immer gleich ein Herzstillstand bevorsteht, sondern weil er mit dem irreversiblen Verlust kritischer cerebraler Funktionen einhergeht. Das Konzept des Hirntodes – als irreversibler Verlust der Fähigkeit des Organismus als Ganzem zu funktionieren, weil sein kritisches System dauerhaft ausgefallen ist – verliert durch das Intervall zwischen Hirntoddiagnose und Herzstillstand nicht seine Gültigkeit.[38] Pragmatisch betrachtet ist es den Kreislauf-Verfechtern nicht gelungen, die Mehrheit auf ihre Seite zu ziehen; diese neigt intuitiv dem Konzept des Hirntodes zu und hält es für hinreichend klar und nützlich, um es als öffentliche Politik beizubehalten.[35]

Kriterien des Todes. Das Feststellen des Ganzhirntods verlangt, am Krankenbett den irreversiblen Verlust aller klinischen Funktionen des Gehirns nachzuweisen. Die weniger verbreitete Stammhirnvariante hingegen erachtet den unwiderruflichen Ausfall der klinischen Funktionen dieses Hirnteils allein als ausreichend. Pallis, einer der eloquentesten Befürworter dieser letzten Todesdefinition, argumentiert, der Hirnstamm sei die Durchgangsstation für praktisch den gesamten Informationsfluss zu und von den Großhirnhemisphären, zudem Sitz der Steuerung von Spontanatmung und Wachheit (die für Bewusstsein essentiell ist).[39]

Ursache des Hirntodes ist typischerweise eine Schädigung des Organs (etwa durch massive Verletzung, Hirnblutung oder Sauerstoffmangel), die den Schädelinnendruck über den mittleren arteriellen Blutdruck ansteigen lässt. Damit kommt die Blutzirkulation im Kopf zum Erliegen und das unter dem Druck vorfallende Gehirn lädiert den Hirnstamm. Nun gibt es aber den ungewöhnlichen Fall, dass dieser Hirnbereich katastrophal geschädigt wird – oft auf Grund einer Blutung –, während Hirnrinde und Thalamus (Sehhügel) verschont bleiben. Wo die Definition des Stammhirntodes Anwendung findet, kann ein solcher Patient, weil die klinischen Funktionen dieses Bereichs erloschen sind, für hirntot erklärt werden, obwohl das Blut weiterhin durch die Schädelhöhle zirkuliert. So wird vielleicht ein Patient mit einer primären Stammhirnläsion (bei der kein erhöhter Schädelinnendruck auftrat) nach den britischen Grundsätzen für hirntot erklärt, nach den US-amerikanischen aber nicht.[40]

Theoretisch könnte eine multifokale, viele Stellen betreffende Stammhirnläsion alle klinisch nachweisbaren Funktionen der Region auslöschen, während irgendeine klinisch nicht detektierbare Restfunktion des so genannten aufsteigenden retikulären Aktivierungssystems noch eine marginale, fluktuierende Form des Bewusstseins gewährleistet. Fehldiagnosen wären dann denkbar. In der Praxis wurde jedoch noch nie über einen solchen Fall berichtet. Um Patienten in einem solchen Zustand zu erkennen, den einige Autoren als Super-locked-in-Syndrom bezeichnen, wären per Definition Zusatzuntersuchungen wie funktionelle Bildgebung oder elektrophysiologische Messungen erforderlich.[35,42]

Test zur Feststellung des Todes. Die erste und bislang einzige zukunftsgerichtete Studie zur Validierung der neurozentrischen Todeskriterien ist die 1977 veröffentlichte multizentrische US Collaborative Study on Cerebral Death, gesponsert von den amerikanischen Nationalen Gesundheitsinstituten.[43] Ziel war, jene Tests zu identifizieren, anhand derer sich vorhersagen ließe, ob trotz kontinuierlicher kardiorespiratorischer Unterstützung innerhalb von drei Monaten ein Herz-Kreislauf-Tod eintritt. Unter den 503 in die Studie aufgenommenen



Patienten zeigten 189 fehlende hirnbedingte Reaktionen auf äußere Reize, Atemstillstand und im Elektroencephalogramm (EEG) eine Nulllinie statt wellenförmige Hirnstromkurven. 187 dieser Patienten waren innerhalb von drei Monaten nach kardiorespiratorischen Kriterien tot, die beiden Überlebenden hatten Arzneimittelvergiftungen erlitten. Die Autoren der Studie empfahlen mindestens eine neuerliche Beurteilung frühestens sechs Stunden nach der Erstdiagnose von Koma und Atemstillstand (abweichend von dem in den Harvard-Kriterien empfohlenen 24-Stunden-Intervall).

Der Ethikrat des amerikanischen Präsidenten gab 1981 als erste Publikation »Defining Death« (Definitionen des Todes) heraus und empfahl zusätzliche diagnostische Untersuchungen, um den Beobachtungszeitraum zu verkürzen.[44] Die American Academy of Neurology (AAN) veröffentlichte 1995 ihre Richtlinien zur Feststellung des Hirntods bei Erwachsenen (linker Kasten S. 63), darunter die wichtige praktische Beschreibung, wie der Atemstillstand zu testen ist.[45] Diese Richtlinien liegen der Vorgehensweise in vielen Krankenhäusern zu Grunde. Eine didaktisch aufbereitete Zusammenfassung zur klinischen und paraklinischen diagnostischen Beurteilung publizierte Wijdicks 2001.[46]

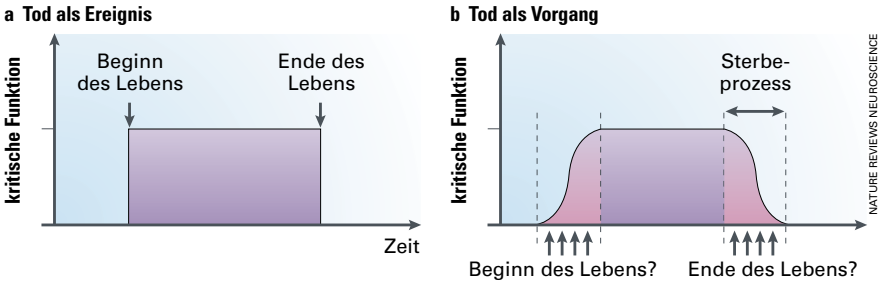
Die klinischen Testbatterien für Ganzhirntod und Stammhirntod sind identisch. Zwei Testreihen zum Absichern der Todesdiagnose existieren, eine neurologische und eine kardiopulmonale. Welche von beiden gewählt wird, hängt von künstlicher Beatmung ab. Bei beatmeten Patienten werden validierte neurologische Test eingesetzt, um den endgültigen Funktionsverlusts des Gehirns (in der Praxis bloß des Stammhirns) sicher festzustellen. Bei Nichtbeatmeten beurteilen Ärzte, ob Herzschlag und Atmung unwiederbringlich fehlen. Gleich ob man neurologische oder kardiopulmonale Kriterien zu Grunde legt – es gibt vier mögliche Todeszeitpunkte, nämlich dann, wenn die kritische zirkulatorische oder neurologische Funktion ausfällt; wenn der Arzt diese kritische Funktion erstmals prüft und ihren Ausfall konstatiert; wenn dieser Funktionsausfall tatsächlich irreversibel wird; oder wenn die Tatsache des definitiven Erlöschens der Funktion dem Arzt zur Kenntnis kommt.[47]

Wie lange ein Kreislauf- und Atemstillstand genau anhalten muss, bevor der Tod eintritt, hat gerade im Hinblick auf das so genannte Pittsburgh-Protokoll[48] für Organspender mit Herzstillstand Kontroversen ausgelöst (es sah eine gut zweiminütige Wartezeit vor). Inzwischen steht zur Debatte, ob das Herz nach fünfminütigem Stillstand nicht wieder von selbst zu schlagen anfängt und ein Patient kardiopulmonalen Kriterien entsprechend danach für tot erklärt werden kann, sofern Reanimationsversuche unterbleiben.[49] In diesem speziellen Kontext tritt der Tod neurologischen Kriterien zufolge erst viele Minuten später ein, wenn der Sauerstoffmangel das Gehirn völlig zerstört hat.[50,51]

Wachkoma ist kein Hirntod

Wie der Hirntod kann auch die klinische Diagnose eines irreversiblen Wachkomas als tragisches Artefakt der modernen Medizin angesehen werden. Als Jennet und Plum 1972 den Begriff »Wachheit ohne Bewusstsein« prägten und vom vegetativen Zustand sprachen,[52] zitierten sie das Oxford English Dictionary, um ihre Wortwahl zu begründen: »Vegetieren bezeichnet ein rein physisches Dasein ohne Verstandestätigkeit oder soziale Interaktion« und »vegetativ umschreibt einen organischen Körper fähig zu Wachstum und Entwicklung, nicht jedoch zu Wahrnehmung und Denken«.[52] Die Kriterien zur Diagnose des Wachkomas sind im rechten Kasten S. 63 zusammengefasst.[53]

Anders als der Hirntod (wenn vortäuschende Faktoren wie etwa Vergiftungen und Unterkühlung ausgeschlossen wurden, wie es seine Definition verlangt) kann das Wachkoma partiell oder völlig reversibel sein. Als »persistierender«, als anhaltender vegetativer Zustand wurde willkürlich ein Wachkoma definiert, das über einen Monat nach Hirnschädigung fortbesteht. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es irreversibel ist.[53] Dagegen impliziert der Begriff »permanenter« vegetativer Zustand, dass sich der Patient nicht wieder erholen wird. Geprägt wurde er von der Multi-Society Task Force on Persistent Vegetative State, die diese Irreversibilität drei Monate nach einer nichttraumatischen oder zwölf Monate nach einer traumatischen Hirnschädigung ansetzt.[53] Die Unterscheidung zwischen persistierendem und permanentem Wachkoma ist sehr wichtig, da leider oft beide als PVS (nach Englisch *vegetative state* für Wachkoma) abgekürzt werden, was zu unnötiger Verwirrung beiträgt.[54] Die Erstbeschreiber des persistierenden Zustands betonten ausdrücklich, dass »anhaltend« nicht »dauernd« heißt. Die aktuelle Empfehlung geht dahin, statt des Adjektivs nur den Zeitraum anzugeben, über den der Zustand bereits besteht. ▷



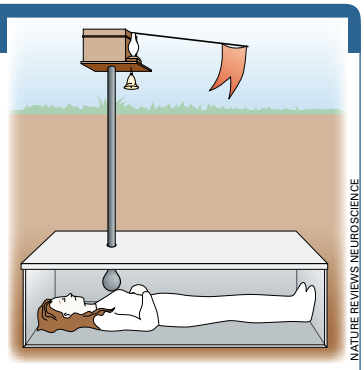
Der Tod – Ereignis oder Vorgang? Tod – definiert als Verlust der Funktionsfähigkeit des Organismus als Ganzem durch Erlöschen seiner kritischen Funktionen (Kreislauf, Atmung, Bewusstsein) – kann als radikales, plötzliches Ereignis (a) oder als fortschreitender Prozess (b) verstanden werden. Zu definieren, wann genau Leben beginnt und endet, ist nach wie vor eine wissenschaftliche Herausforderung.

▷ Bessert er sich nach drei bis zwölf Monaten, abhängig von der Krankheitsursache, nicht, kann er für permanent erklärt werden. Erst dann ergeben sich die ethischen und juristischen Fragen hinsichtlich einer Beendigung der Therapie.[55,56] Ein vegetativer Zustand tritt auch im Endstadium chronischer neurodegenerativer Erkrankungen wie der Alzheimer-Krankheit auf sowie bei anencephalen Neugeborenen.

Man könnte meinen, der Unterschied zwischen Hirntod und vegetativem Zustand sei so grundlegend, dass er nicht weiter erörtert werden muss. Tatsächlich jedoch werden die beiden Begriffe in der Publikums- und sogar in der Fachpresse allzu oft verwechselt. Zum Teil dürfte das daran liegen, dass viele Laien die Begriffe Hirntod und Wachkoma gleichbedeutend verwenden.[57] Dies begann schon, als die New York Times am 5. August 1968 über die Harvard-Hirntodkriterien berichtete. In dem begleitenden Editorial heißt es: »Seit den Anfängen der Medizin stellt sich die Frage, was mit dem menschlichen Dahinvegetierenden zu tun sei. ... Manche dieser lebenden Leichen überleben seit Jahren. ... Solche Fälle wie auch den steigenden Bedarf an Spenderorganen hatte das Harvard-Komitee im Sinn, als es darauf drang, irreversibles Koma als Tod umzudefinieren.«[57] Nach einer Studie von 1998 glaubte fast die Hälfte der befragten Neurologen und Pflegeheimleiter in den USA, Patienten in vegetativem Zustand könnten für tot erklärt werden.[58] Daher möchte ich im Folgenden die klinischen, diagnostischen und neuropathologischen Unterschiede zwischen Hirntod und Wachkoma erörtern.

Klinische Zeichen. Sowohl hirntote Patienten als auch Wachkomapatienten sind auf Grund einer schweren Hirnschädigung bewusstlos. Der erste Unterschied zwischen beiden ist der Zeitpunkt der Diagnose: Der Hirntod kann mit außerordentlich hoher Sicherheit innerhalb von Stunden oder Tagen nach dem akuten Schadensereignis festgestellt werden,[46] während die Irreversibilität eines Wachkomas frühestens drei Monate nach nichttraumatischer beziehungsweise zwölf Monate nach traumatischer Hirnschädigung gesichert ist.[53] Im Gegensatz zu hirntoten Patienten, die per Definition komatös sind (also auch auf Schmerzreize hin nie die Augen öffnen), halten Wachkomapatienten (die nicht komatös im engeren Sinne sind) im klassischen Fall von selbst ihre Augen offen, was Angehörige und Pflegekräfte sehr irritieren kann. Hirntote Patienten müssen künstlich beatmet werden, Wachkomapatienten nicht (wenn sie auch unter Umständen in der Akutphase nach der Schädigung für einige Zeit unterstüt-

Angst vor falschen Todesdiagnosen und Organspende


NATURE REVIEWS NEUROSCIENCE

Schon seit Jahrhunderten fürchten Menschen, noch lebend für tot erklärt zu werden. Der Anatom Andreas Vesalius (1514–1564) wurde des Mordes beschuldigt, nachdem er bei einer Autopsie ein noch schlagendes Herz freigelegt hatte.[130] Edgar Allen Poes eindringliche Erzählungen über Menschen, die lebendig begraben wurden, fachten diese Ängste im neunzehnten Jahrhundert erneut an.[131] Baron Karnice-Karnicky, Kammerherr des russischen Zaren, patentierte und vermarktete 1896 eine Vorrichtung zur Rettung lebendig Begrabener (siehe Abbildung). Mit ihrer Hilfe konnte der Begrabene eine Glocke betätigen und ein Fähnchen heben. Das Ganze war für geringes Entgelt zu mieten. War nach einiger Zeit nicht mehr mit einem Wiedererwachen zu rechnen, wurde das Rohr mit der Signaleinrichtung aus dem Sarg gezogen und woanders wieder verwendet. Irgendeine Erfolgsquote ist nicht überliefert.

Heute sind die Definition des Todes und eine Organentnahme durch die »Totspender-Regel« eng miteinander verquickt. Ihr zufolge ist eine Entnahme lebenswichtiger Organe nur bei Spendern zulässig, die zuvor für tot erklärt wurden. Es gilt daher auch als unethisch, Patienten zu diesem Zweck zu töten, gleichgültig wie krank sie sind oder wie groß der Nutzen für die Empfänger wäre. Um Interessenkonflikte zu vermeiden, sind Transplantationschirurgen von der Hirntoddiagnostik ausgeschlossen. Nachdem die BBC am 13. Oktober 1980 in einem TV-Beitrag mit dem Titel »Transplantationen – sind die Spender wirklich tot?« unterstellt hatte, nicht alle für hirntot erklärten Patienten seien es wirklich, ging die Zahl der Nierenspenden zurück.[10]

Die neurozentrische Definition des Todes kam zwar vor der Verpflanzung mehrerer Organe eines Spenders auf (siehe Zeitleiste S. 64), doch ist der Organbedarf ein wesentlicher Motor bei der Popularisierung und Legalisierung des Hirntodkonzepts gewesen. Trotz bestehendem Spendermangel sollte unsere Definition des Todes nicht dazu dienen, derartige Transplantationen zu erleichtern. Die öffentliche Akzeptanz solcher Organspenden hängt wesentlich von der Verlässlichkeit der Hirntoddiagnostik und dem Vertrauen in die Totspender-Regel ab.[129]

In jüngerer Zeit jedoch sprechen sich manche dafür aus, diese Regel zu brechen[132-134] und etwa die Organentnahme auch ohne vorausgehende Erklärung des Hirntodes zuzulassen: bei schwer hirngeschädigten Patienten ohne Aussicht auf Heilung oder bei unmittelbar moribunden Patienten, wenn sie selbst oder ihre Angehörigen nach entsprechender Aufklärung zugestimmt haben.[135]

Die American Medical Association schlug 1995 anencephale, nur ein Hirnrudiment besitzende Neugeborene als Organspender vor.[136] Als Rechtfertigung diente die Möglichkeit, todgeweihte Kleinkinder zu retten und den Familien der anencephalen Neugeborenen ein Gefühl der Sinnhaftigkeit zu geben.[137] Angesichts der öffentlichen Reaktionen und der wissenschaftlich ungeklärten Frage nach dem Bewusstsein bei Anencephalie (ein Beispiel dazu sind Säuglinge mit angeborener »Entrindung«[138]) blieb jedoch das zuvor gültige Verbot bestehen.[139]

Auch Wachkomapatienten wurden als Organspender in Betracht gezogen.[140-142] Das Internationale Forum für Ethik in der Transplantationsmedizin schlug vor, wenn über den Abbruch der lebenserhaltenden Maßnahmen entschieden war, vor Entnahme der Organe eine tödliche Spritze zu setzen.[140] Auch hier wurden zur Begründung wieder humanitäre Argumente herangezogen, man umginge den nutzlosen Einsatz von Ressourcen, um einen Patienten ohne Chance einer Besserung am Leben zu halten, und mache geeignete Spenderorgane verfügbar. Der Vorschlag wurde jedoch nicht angenommen, da er entweder die Totspender-Regel verletzt[143] oder ein Umändern der Definition von Tod erfordert[144], außerdem würde der zu erwartende Widerstand in der Öffentlichkeit die derzeitige Organspendepraxis beeinträchtigen.[145]

zend beatmet werden). Zudem sind im Wachkoma die Stammhirnreflexe und Hypothalamusfunktionen erhalten (beispielsweise die Regulation von Körpertemperatur und Gefäßwandspannung).

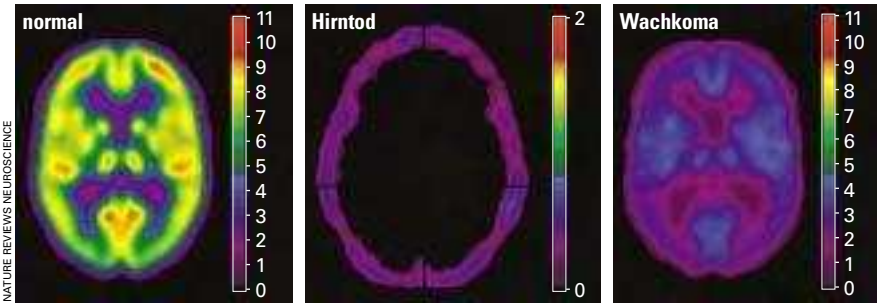
Hirntote Patienten lassen bestenfalls eingeschränkte, durch Restaktivität des Rückenmarks verursachte Bewegungen erkennen. Möglich sind bei bis zu einem Drittel: Fingerzucken, wellenförmiges Bewegen der Zehen nacheinander, Anwinkeln der Beine wie beim Treppensteigen, Lazaruszeichen (nach beispielsweise passiver Kopfbewegung Beugen der Arme zur Brust), Dreh-Streckreflex sowie oberflächliches »Muskelwogen« im Gesicht.[59,60] Wachkomapatienten zeigen ein wesentlich vielfältigeres Repertoire von Bewegungen, die jedoch inkonsistent und nie zweckgerichtet sind. Koordinierte motorische Aktivitäten treten nur in Form subcorticaler stereotyper reflexhafter Reaktionen auf externe Stimuli auf: Bewegungen von Rumpf, Extremitäten, Kopf oder Augen sowie unwillkürliches Zusammenzucken als Schreckreaktion auf laute Geräusche.[53] Hirntoten fehlt jegliche Mimik und sie bleiben stumm, während Wachkomapatienten gelegentlich lächeln, weinen, Grunzlaute ausstoßen oder stöhnen und schreien.[53,106]

Apparative Diagnostik. Mit der Hirn-Angiografie und der transkranialen Dopplersonografie lässt sich das Fehlen der Hirndurchblutung mit hoher Sensitivität und hundertprozentiger Spezifität nachweisen.[62] Bildgebende Untersuchungen mit Radionukliden wie die Einzel-Photonenemmisions-Tomografie und die Positronenemissions-Tomografie (PET) belegen das Erlöschen der neuronalen Stoffwechselaktivität im gesamten Gehirn.[41,63] Klassisch für den Hirntod: Auf den Aufnahmen erscheint die Schädelhöhle leer (Abbildungen oben). Eine solche »funktionelle Enthauptung« ist bei Wachkomapatienten nie zu beobachten. Bei ihnen sind Hirndurchblutung und Stoffwechselaktivität der Hirnrinde zwar stark reduziert (auf 40 bis 50 Prozent der Normalwerte),[41] nie jedoch völlig verschwunden. Bei einigen Wachkomapatienten wurde bei der PET sogar eine normale Stoffwechselaktivität[64] oder Durchblutung[65] festgestellt. Zudem kann die Ruhestoffwechselmessung mit der PET nicht verlässlich zwischen Wachkoma und Zuständen mit minimalem Bewusstsein unterscheiden.[66,67]

Im Elektroencephalogramm ist bei hirntoten Patienten mit einer Sensitivität und Spezifität von 90 Prozent die erloschene elektrische Aktivität der Hirnrinde nachzuweisen, also ein Nulllinien-EEG.[68] Es ist der bestvalidierte und – da breit verfügbar – auch der bevorzugte Bestätigungstest in den Hirntod-Richtlinien vieler Länder. Das EEG von Wachkomapatienten hingegen enthält nur sporadische Phasen mit fehlender oder minimaler Aktivität.[53] Meist ist es nur diffus verlangsamt, durch vielgestaltige Delta- oder Theta-Wellen.[69]

Die Untersuchung auf so genannte somatosensorisch evozierte Potentiale (ausgelöst etwa durch einen äußeren Schmerzreiz) zeigt bei hirntoten Patienten typischerweise an, dass die Reizleitung zum Gehirn auf Höhe des Halsmarks unterbrochen ist.[70] Bei Wachkomapatienten hingegen sind corticale evozierte Potentiale (N20) oft erhalten[71] sowie akustisch evozierte Stammhirnpotentiale. Letztere sind bei hirntoten Patienten gewöhnlich bis auf die verzögert auftretende Welle 1, die dem Hörnerv entspringt, erloschen.[70] Bisher gibt es jedoch zu wenige einschlägige Studien mit detaillierten klinischen Korrelationen, als dass man ihnen validierten diagnostischen Wert zubilligen dürfte.

Pathologische Merkmale. Bei hirntoten Patienten mit maximaler apparativer Unterstützung zeigt sich bereits etwa zwölf Stunden nach Versagen der Hirnperfusion unvermeidlich das pathologische anatomische Bild des »Beatmungshirns«: infolge Venenstauung geschwollene oberflächliche Blutgefäße, Thrombosen in corticalen Venen und Venenräumen, Stau und Blutungen in der Hirnrinde, Letztere auch in der Hirnrückenmarksflüssigkeit.[72] Nach etwa einer Woche hat sich das Hirngewebe durch Autolyse verflüssigt und läuft bei der Trepanation aus der Schädelkalotte.[73] Ein solch dramatischer Zerfall des Gehirns ist beim Wachkoma nie zu beobachten. Zu dessen pathologischen Befunden gehören, wenn starker Sauerstoffmangel die Ursache für den Zustand war, laminäre Nekrosen an vielen Stellen der Hirnrinde, diffuse pathologische Veränderungen der weißen Hirnsubstanz und beidseitige Nekrosen des Thalamus. Bei einem Wachkoma nach stumpfem Schädelhirntrauma zeigen sich im klassischen Fall diffuse Schädigungen der weißen Substanz und Nervenzellverluste in Thalamus und Hippocampus.[74]

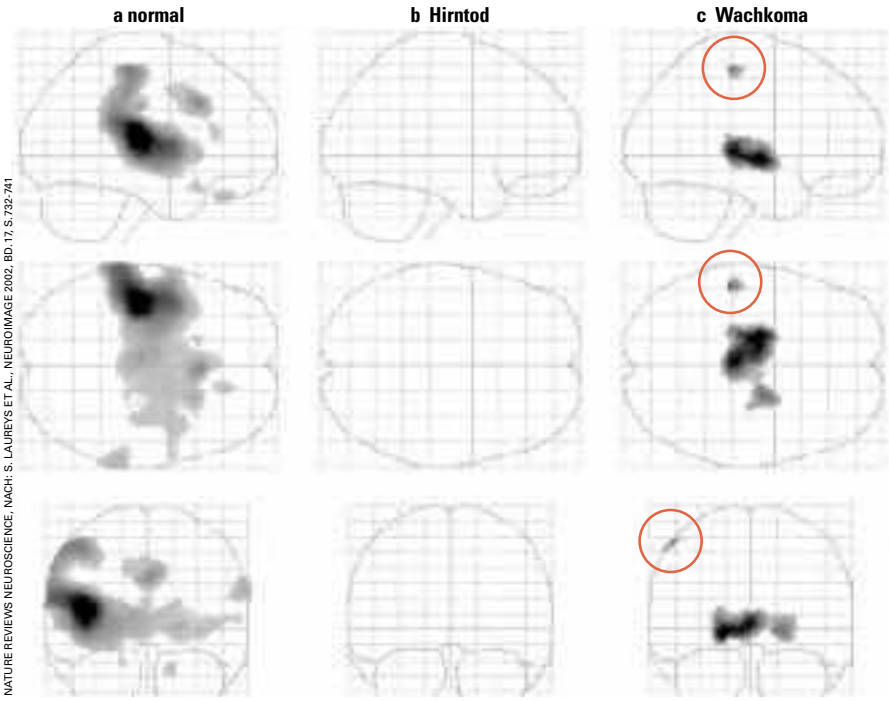


Gesunde, Hirntote und Wachkomapatienten unterscheiden sich in der Aktivität des Ruhestoffwechsels ihres Gehirns. Bei hirntoten Patienten erscheint der Schädel durch das völlige Fehlen eines cerebralen Stoffwechsels wie leer, was einer »funktionellen Enthauptung« gleichkommt. Ganz anders bei Wachkomapatienten: Ihr Hirnstoffwechsel ist zwar massiv global um 50 Prozent reduziert, aber nicht erloschen. Die Farbskala zeigt die Menge an Glucose, die von 100 Gramm Hirngewebe pro Minute verstoffwechselt wird.

Mythos Großhirntod

Der schottische Neurologe Brierley und seine Kollegen drängten 1971 darauf, Tod zu definieren als den dauernden Ausfall »jener höheren Funktionen des Nervensystems, die den Menschen von niederen Primaten unterscheiden«.[75] Diese neocorticale Definition des Tods, auch Großhirntod genannt, wurde von anderen Autoren, zumeist Philosophen, weiterentwickelt.[25,26] Konzeptionell beruht sie auf der Voraussetzung, dass Bewusstsein, Denkvermögen und soziale Interaktion – nicht aber die physiologische Funktionsfähigkeit des Organismus – die entscheidenden Charakteristika menschlichen Lebens darstellen. Das Todeskriterium ist diesem Konzept nach erfüllt, wenn nur die Funktionen des Neocortex und nicht etwa des gesamten Gehirns oder des Hirnstamms dauerhaft erloschen sind. Klinische Tests sowie Zusatzuntersuchungen hierfür wurden jedoch nie als solche validiert.

Der neocorticalen Definition zufolge gelten Patienten im Wachkoma, sei es ▷



NATURE REVIEWS NEUROSCIENCE, NACH: S. LAUREYS ET AL., NEUROIMAGE 2002, BD. 17, S. 732-741

Aktivität der Hirnrinde, des Cortex, nach Schmerzreiz. Bei gesunden Menschen aktivieren Schmerzreize ein ausgedehntes Netzwerk von Neuronen, die Schmerzmatrix (a); bei Hirntoten ist keinerlei cerebrale Aktivität erkennbar (b); Wachkomapatienten zeigen gewisse Aktivitäten in tieferen Regionen (oberer Hirnstamm und Thalamus) und in der Hirnrinde (primärer somatosensorischer Cortex; roter Kreis). Die reproduzierbare corticale Aktivierung bei jedem der 15 hier untersuchten Wachkomapatienten passt nicht zum Konzept des Großhirntodes im vegetativen Zustand. Sie beschränkt sich allerdings auf die primären somatosensorischen Zentren und erreicht nicht die höheren, assoziativen Rindenareale. Sie sollte, solange wir das »neuronale Korrelat des Bewusstseins« nicht wirklich kennen, zur Vorsicht mahnen, selbst wenn sich die große Mehrheit der Neurowissenschaftler einig ist, dass eine isolierte Aktivität im primären Cortex für eine bewusste Wahrnehmung nicht ausreicht.

▷ nach akuten Verletzungen oder chronischen degenerativen Erkrankungen, sowie anencephale Neugeborene als tot. Abhängig davon, wie der »irreversible Verlust der Fähigkeit zur sozialen Interaktion« ausgelegt wird, könnten sogar Patienten im dauernden »Zustand minimalen Bewusstseins«, die ja per Definition zu funktioneller Kommunikation nicht in der Lage sind, als tot betrachtet werden. Meines Erachtens lässt sich dieses Konzept des Todes, so attraktiv es aus theoretischen Überlegungen für einige Autoren auch sein mag, nicht zuverlässig nach neuroanatomischen Kriterien oder durch sichere klinische Prüfungen anwenden.

Erstens: Unser wissenschaftliches Verständnis der notwendigen und hinreichenden neuronalen Korrelate des Bewusstseins ist derzeit bestenfalls unvollständig.[79,80] Im Gegensatz zum Hirntod, mit seinen gut etablierten neuroanatomischen und neurophysiologischen Grundlagen, lässt sich menschliches Bewusstsein bislang nicht mit Hilfe pathologisch-anatomischer, bildgebender oder elektrophysiologischer Methoden feststellen. Daher können auch keine genauen anatomischen Kriterien zur Diagnose des Großhirntodes formuliert werden.

Zweitens: Für klinische Tests am Krankenbett müsste am Verhalten des Patienten zu erkennen sein, dass er das Bewusstsein unwiderruflich verloren hat. Sicher zu wissen, ob ein anderes Lebewesen seiner selbst bewusst ist oder nicht – dafür existiert aber eine absolute philosophische Grenze.[81] Bewusstsein ist eine subjektive Erste-Person-Erfahrung mit vielen Fassetten. Die klinische Überprüfung beschränkt sich jedoch darauf zu bewerten, ob der Patient auf die Umgebung anspricht.[82] Wie erwähnt, können sich Wachkomapatienten im Gegensatz zu hirntoten Patienten umfangreich bewegen. Wie schwierig es ist, »automatische« von »willentlichen« Bewegungen zu unterscheiden, haben klinische Studien gezeigt.[83] Die verhaltensbiologischen Indikatoren des Bewusstseins werden daher unterschätzt und wohl bei etwa einem Drittel der Patienten im chronischen Wachkoma fehlgedeutet.[84,85]

Auch bei älteren Demenzpatienten in Pflegeheimen wird oft fälschlicherweise ein Wachkoma diagnostiziert.[86] Klinisch auf fehlendes Bewusstsein zu testen ist wesentlich problematischer als auf fehlende Wachheit, Ausfall von Stammhirnreflexen und Atemstillstand wie bei der Diagnose des Ganz- oder Stammhirntodes. Das Wachkoma ist das untere Ende eines Kontinuums verschiedener Bewusstseinszustände. Um die subtilen Unterschiede zu einem Zustand minimalen Bewusstseins zu erkennen, bedarf es wiederholter Untersuchungen durch erfahrene Ärzte. Praktisch impliziert das neocorticale Todeskonzept auch das Begräbnis atmender »Leichen«.

Drittens: Zusatzuntersuchungen zur Diagnose des neocorticalen Todes müssten bestätigen, dass alle Hirnrindenfunktionen irreversibel erloschen sind. Wachkomapatienten sind jedoch entgegen früherer Annahmen nicht apallisch[87,88]; ihr Großhirn oder dessen Rinde kann Inseln mit erhaltener Funktion aufweisen. Die Annahme, der Neocortex sei im Wachkoma völlig abgestorben, wurde kürzlich mit funktionellen bildgebenden Verfahren widerlegt. Die Studien belegten eine zwar begrenzte, aber zweifelsfrei vorhandene neocorticale Aktivierung (Bilder links). Die Ergebnisse sind allerdings mit Vorsicht zu interpretieren, solange wir die neuronalen Grundlagen des Bewusstseins nicht völlig verstehen. Zusatzuntersuchungen, um zu prüfen, ob neocorticale Integrationsleistungen fehlen, sind wiederum bislang weder durchführbar noch validiert.

Wie erwähnt, lässt sich hingegen ein Ausfall der gesamten Hirnfunktionen mit Hilfe mehrerer Verfahren bestätigen, wie cerebrale Angiographie (die Hirnarterien füllen sich nicht), transkraniale Dopplersonographie (fehlender Blutfluss bei der Herzerschlaffung oder typischer Pendelfluss), Bildgebung mit Nukliden (fehlende Hirndurchblutung; »leerer Schädel«) oder EEG (fehlende elektrische Aktivität). Demgegenüber kann die drastisch reduzierte, jedoch nicht völlig fehlende corticale Stoffwechselaktivität[64,89-93] bei Wachkomapatienten nicht als Indiz für Irreversibilität betrachtet werden. Tatsächlich gibt es voll reversible veränderte Bewusstseinszustände wie im Tiefschlaf[94] oder unter Narkose[95-97], die

mit ähnlichen Abnahmen der Hirnfunktion einhergehen. Und bei den wenigen Patienten, die sich aus dem Wachkoma erholten, kehrte die Aktivität des zuvor funktionslosen assoziativen Neokortex fast auf Normalniveau zurück.[98,99]

Verfechter der neocorticalen Todesversion dürften indes einwenden, dass alle Definitionen von Tod und Wachkoma mit klinischen Zeichen arbeiten und dass daher der Nachweis gewisser Stoffwechselaktivitäten mittels Neuroimaging das Konzept nicht widerlege (da diese Untersuchungen nicht-klinische Aktivitäten messen). Validierte nicht-klinische Labortests werden aber durchaus eingesetzt, um einen Ganzhirntod zu bestätigen.

Als Viertes und Letztes: Entscheidend im Rahmen eines jeglichen Todeskonzepts ist die Irreversibilität festzustellen. Die darauf abzielenden klinischen Untersuchungen haben sich bisher nur im Zusammenhang mit den Ganzhirn- oder Stammhirntod bewährt. Seit Mollaret und Goulon vor 45 Jahren erstmals ihre neurologischen Kriterien zur Feststellung des Todes formulierten,[1] ist kein einziger Patient mit apnoischem Koma je wieder zu Bewusstsein gekommen, der sachgemäß für hirntot beziehungsweise stammhirntot erklärt wurde.[10,35,100] Dies gilt nicht für das Wachkoma, bei dem der Begriff permanent den Charakter einer Wahrscheinlichkeitsaussage hat: Die Chancen auf Erholung sind abhängig vom Alter des Patienten sowie Ursache und Dauer des vegetativen Zustands.[101] Im Gegensatz zum Hirntod, der sich bereits in der Akutsituation diagnostizieren lässt, kann ein Wachkoma erst nach langer Beobachtungszeit als statistisch gesehen permanent angesehen werden, aber selbst dann besteht immer noch eine minimale Chance auf Erholung. Allerdings sind viele Einzelberichte über eine späte Erholung aus dem Wachkoma schwer zu bestätigen und häufig lässt sich schlecht klären, wie sicher die ursprüngliche Diagnose war.

Ethik des Todes und des Sterbens

Mit der Debatte, was Fortsetzung oder Abbruch »vergeblicher« lebensverlängernder Maßnahmen und ein »Sterben in Würde« anbelangt, begannen einige Intensivmediziner – nicht etwa Ethiker oder Juristen – bereits Mitte der siebziger Jahre.[102] Derzeit geht fast der Hälfte aller Todesfälle auf Intensivstationen die Entscheidung voraus, Behandlungen abzubrechen oder zu unterlassen.[103] Dabei wird zwischen Abbruch und Unterlassung weder moralisch noch juristisch unterschieden.[104]

Da ein hirntoter Patient bereits tot ist, kann er nicht mehr durch das Abstellen des Beatmungsgeräts sterben. Wachkomapatienten hingegen sind nicht tot. Wird ihr Zustand aber hoffnungslos, kann man es als unethisch erachten, die lebenserhaltende Therapie fortzuführen. Anders als hirntote Patienten benötigen Wachkomapatienten gewöhnlich keine Beatmung oder Kreislaufunterstützung, sondern nur Flüssigkeitszufuhr und künstliche Ernährung. Bei dem international diskutierten Fall der Amerikanerin Terri Schiavo[13-15] ging es zunächst um die widerstreitenden Ansichten ihres Manns und ihrer Eltern darüber, ob die Patientin in einem so schwer behinderten Zustand hätte weiterleben wollen. Die Angehörigen waren sich auch uneins über die Richtigkeit der Wachkomadiagnose. Der Fall zeigt, wie schwierig es für Laien – wie auch für unerfahrene Ärzte und politische Entscheidungsträger – sein kann, den medizinisch etablierten ethischen Rahmen zu akzeptieren, in dem ein Sterbenlassen im irreversiblen Wachkoma gerechtfertigt ist. Die Fehlinformationen im Zusammenhang mit Terri Schiavos und anderen stark beach- ▷

Religion und Tod

Sowohl im Judentum als auch im Islam beruht die Definition von Tod traditionell auf dem Atemstillstand, inzwischen ist dort aber auch die des Hirntodes akzeptiert.[146] Die katholische Kirche vertritt den Standpunkt, es sei nicht Sache der Religion, den Todeszeitpunkt festzulegen. Zehn Jahre vor der Formulierung der Harvard-Kriterien für den Hirntod wandte sich eine Gruppe von Anästhesisten beunruhigt an Papst Pius XII., weil die neuen Techniken der Wiederbelebung und Intensivmedizin manchmal mehr der Verlängerung des Sterbens zu dienen schienen als der Rettung von Leben. Der Papst – ganz auf der Höhe der modernen Medizin und ihr damals sogar voraus – erklärte 1957, es gebe keine Verpflichtung zu außerordentlichen lebensverlängernden Maßnahmen bei kritisch Kranken.[147] Abbruch und Unterlassung lebenserhaltender Maßnahmen bei Patienten mit akuten und irreversiblen schweren Hirnschäden wurde dadurch zu einer ethisch vertretbaren Option.

Was nun lebensverlängernde Behandlungen bei chronischen Zuständen wie dem Wachkoma anbelangt, so fällt es vielen schwer, künstliche Ernährung und Flüssigkeitszufuhr als »außerordentliche« Maßnahmen zu betrachten. In neueren ethischen und juristischen Diskursen wurde jedoch das ursprüngliche Begriffspaar gewöhnlich-außergewöhnlich aufgegeben zu Gunsten angemessener gegen nicht angemessener Maßnahmen. Viele prominente progressive katholische Theologen akzeptieren das Konzept der therapeutischen Vergeblichkeit bei Patienten im irreversiblen Wachkoma und verteidigen die Entscheidung zum Abbruch der künstlichen Ernährung und Flüssigkeitsversorgung in gut dokumentierten Fällen.[148] Papst Johannes Paul II. allerdings vertrat in seiner Botschaft an Teilnehmer eines internationalen Kongresses zum Wachkoma im März 2004 (Näheres unter www.spektrum.de/hirntod) die Auffassung, der Abbruch lebenserhaltender Maßnahmen bei Wachkomapatienten sei moralisch keinesfalls akzeptabel.[149]

Viele der zum Kongress eingeladenen Neurowissenschaftler nahmen jedoch differenziertere Standpunkte ein, und auch einige römisch-katholische Theologen sahen die päpstliche Haltung im Widerspruch zur christlichen Tradition. 1957 hatte die katholische Kirche es als moralisch legitim anerkannt, die Verpflichtung anzuzweifeln, einen Patienten mit akuten schweren Hirnschäden (irreversiblem Koma) um jeden Preis zu behandeln. Diese Legitimität steht jedoch zur jüngsten Ablehnung im Widerspruch, im chronischen Fall (irreversibles Wachkoma) einen Abbruch lebenserhaltender Maßnahmen zuzulassen. In ihrer offiziellen Position spielt die Kirche die Realität der Endgültigkeit eines lange bestehenden Wachkomas herunter und erachtet künstliche Ernährung und Flüssigkeitszufuhr nicht als Therapiemaßnahmen.

Bisher hat diese Haltung in den USA noch nicht zu einer Veränderung der Praxis geführt. Der Entzug lebenserhaltender Maßnahmen bei Patienten in irreversiblem Wachkoma ist nach wie vor eine legitime Option, die der oberste Gerichtshof der USA im Fall von Nancy Cruzan bestätigte und die auch von zahlreichen anderen medizinischen, ethischen und juristischen Autoritäten vertreten wird.[150] (siehe Kasten S. 70)

Tod und Gesetz

Nach dem Uniform Determination of Death Act der USA[151] gilt ein Mensch als tot, wenn Ärzte anhand maßgebender klinischer Kriterien feststellen, dass die Funktionen des Herz-Kreislauf-Systems oder des Gehirns ausgefallen sind und nicht wiederhergestellt werden können.[146] Dabei ist die neurozentrische Definition des Todes bewusst redundant formuliert und fordert den Nachweis, dass »alle Funktionen des gesamten Gehirns, einschließlich des Stammhirns« irreversibel erloschen sind.[151] Die Kriterien der American Academy of Neurology sind im linken Kasten S. 63 aufgeführt; die in Kanada gültigen Leitlinien sind praktisch identisch.[152] Finnland erkannte 1971 als erstes europäisches Land die Hirntodkriterien an und alle EU-Länder folgten. Die zu prüfenden klinischen Zeichen sind zwar einheitlich, doch weniger als die Hälfte der europäischen Länder verlangt bestätigende apparative Untersuchungen und mehr als die Hälfte fordert, dass mindestens zwei Ärzte den Hirntod feststellen.[153]

Solche Zusatztests sind in vielen Ländern der Dritten Welt nicht Pflicht, da schlicht nicht verfügbar. Nicht in allen asiatischen Ländern sind die Hirntodkriterien akzeptiert und die Regelungen unterscheiden sich zum Teil erheblich. Indien zum Beispiel übernahm die britischen Kriterien des Stammhirntodes.[154] In China besteht keine gesetzliche Vorgabe und viele Ärzte zögern anscheinend, die Beatmung bei Patienten mit irreversiblem Koma einzustellen.[57] In Japan sind die Hirntodkriterien zwar inzwischen offiziell anerkannt, die Öffentlichkeit bleibt jedoch skeptisch. Möglicherweise geht diese Haltung noch auf den Fall des Herzchirurgen Sura Wada zurück, der 1968 wegen Mordes vor Gericht stand, nachdem er einem angeblich nicht hirntoten Patienten das Herz entnommen hatte.[155] In Australien und Neuseeland sind die Kriterien des Ganzhirntods anerkannt.[156]

Einige Juristen befürworten auch die Großhirntod-Definition,[157,158] haben aber bisher weder Gesetzgeber noch Richter von der Validität überzeugt. Ein Arzt, der einen dauerhaft bewusstlosen, aber selbst atmenden Patienten für tot hält, riskiert Strafverfolgung und zivilrechtliche Klagen wegen schuldhafter Tötung, wenn er nach diesem Glauben gehandelt hat.[146] Der irreversible Verlust des Bewusstseins allein berechtigt nach keiner medizinischen Richtlinie und nach keinem Gesetz, einen Patienten für tot zu erklären; unabdingbar sind stets Indizien für den Ausfall der Stammhirnfunktionen. Der Entzug einer Behandlung, die dem Patienten nach menschlichem Ermessen keinen Nutzen mehr bringt, ist jedoch medizinisch und juristisch akzeptiert; und es wurde bisher kein Arzt wegen Mordes angeklagt, der dies in gut dokumentierten Fällen von Patienten im irreversiblen Wachkoma getan hat.[106] Allerdings wurden in den 1980er Jahren N. Barber und R. Nejdl in Kalifornien wegen versuchten Mordes angeklagt, nachdem sie einem Patienten nach nur siebentägigem Koma sämtliche Therapien einschließlich künstlicher Ernährung und Flüssigkeitszufuhr entzogen hatten. Die Klage wurde jedoch zurückgewiesen und der Bewusstseinszustand des Patienten entwickelte sich in der Folge zu einem irreversiblen Wachkoma.[159]

▷ teten Fällen vergrößern möglicherweise die Verwirrung und Konsternation der Gesellschaft über medizinische Entscheidungen am Ende des Lebens.[105-107]

Der Abbruch künstlicher Ernährung und Flüssigkeitszufuhr bei Wachkomapatienten ist eine hochkomplexe Thematik, und es würde den Rahmen hier sprengen, alle dabei auftretenden ethischen, juristischen und praktischen Dilemmata zu erörtern (einen tieferen Einblick gibt die aktuelle Monografie von B. Jennett[106]). Es ist jedoch zu betonen, »dass sich ein Arzt nicht von einer adäquaten aggressiven Therapie abbringen lassen darf, solange nicht klar feststeht, dass der Patient permanent bewusstlos ist«[108] und dass Ärzte darüber hinaus »zu einer effektiven palliativen Therapie verpflichtet sind«.[109] Amerikanische[110-112] und internationale Fachgesellschaften sowie interdisziplinäre Vereinigungen, etwa die American Medical Association,[108] die British Medical Association[113] und die World Medical Association[114], versichern, dass gesetzliche Vertreter und Ärzte mit einer vom Patienten erteilten Verfügung das Recht haben, im Falle eines permanenten Wachkomas alle lebenserhaltenden medizinischen Maßnahmen, einschließlich Flüssigkeitszufuhr und künstlicher Ernährung, abzubrechen.

Die ethisch-moralischen Werte, die diesen Richtlinien zu Grunde liegen, sind die vier Prinzipien Autonomie (Respekt vor der Person), Fürsorge für den Patienten, nicht zu schaden und Gerechtigkeit.[115] Informierte urteilsfähige Patienten sollten mit allen Therapien, die sie erhalten, einverstanden sein und das Recht haben, über ihren Körper und ihr Leben selbst zu bestimmen. Das Ausmaß der Therapie bei nicht entscheidungsfähigen Patienten sollte primär auf dem zuvor persönlich geäußerten Willen des Patienten hierzu beruhen. Weniger stark betont wird das Prinzip menschliche Autonomie, ein Kind der Aufklärung, außerhalb des europäischen und angloamerikanischen Kulturkreises, so zum Beispiel in Japan.[116] In der westlichen Welt wird das Recht des autonomen Individuums, über den Abbruch lebensverlängernder Maßnahmen selbst zu befinden, vor allem von Seiten einiger vitalistisch-religiöser Gruppierungen (orthodoxe Juden, fundamentalistische Christen) bestritten, die der Auffassung sind, dass nur Gott allein über das Ende des Lebens entscheiden darf (Kasten S. 69).

In der Vergangenheit haben Ärzte das Fürsorgeprinzip meist als Verpflichtung ausgelegt, das Leben ihrer Patienten um fast jeden Preis zu erhalten. Angesichts des medizin-technischen Fortschritts besteht die ethische Aufgabe der Ärzte jedoch heute nicht mehr darin, derart paternalistisch zu handeln, sondern dem Patienten die Entscheidung darüber zu belassen, welches Leben ihm lebenswert erscheint und welches nicht. Medizinische Entscheidungen sollten daher heute die individuellen Wertvorstellungen des Patienten berücksichtigen, selbst wenn diese von der Auffassung des behandelnden Arztes abweichen.[117]

Kann ein Patient nicht mehr für sich selbst sprechen, so scheint der vernünftigste Kompromiss zu sein, einen ihm nahe stehenden Menschen in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. Kritiker wenden jedoch ein, dass Entscheidungen der Stellvertreter falsch sein könnten. Denn während es die meisten Menschen nicht wünschenswert finden, im permanenten Wachkoma weiterzuleben, scheinen schwerbehinderte Patienten mit Hirnschäden dies durchaus zu wollen.[119-122] Einige Studien ergaben, dass Vorhersagen von Ehepartnern, ob der oder die andere eine Wiederbelebung wünscht oder nicht, nur begrenzt zutreffen.[123] Zudem unterschätzen gesunde Menschen gewöhnlich die Lebensqualität Behinderter.[124] ▷

▷ Das Prinzip Gerechtigkeit, das auch Gleichbehandlung impliziert, fordert, dass der Wert eines Individuums nicht nach sozialem Status oder körperlichen und geistigen Eigenschaften bemessen werden darf. Schutzbedürftige Individuen – wie schwer hirngeschädigte kommunikationsunfähige Patienten, Menschen mit anderen Behinderungen, ganz Junge oder Hochbetagte – dürfen nicht anders behandelt werden als Gesunde. Keines Menschen Leben hat mehr oder weniger eigenen Wert als das eines anderen. Nach einem Modell zur Vergeblichkeit medizinischer Maßnahmen sollte das Konzept Gerechtigkeit Priorität gegenüber dem beanspruchten Recht auf Autonomie Vorrang genießen.[125]

Die Vergeblichkeit einer medizinischen Maßnahme ist dann anzunehmen, wenn sie auf Basis der besten verfügbaren Informationen dem Patienten voraussichtlich nicht den sonst erhofften Nutzen bringen wird (ab welcher Wahrscheinlichkeit dies »ethisch vertretbar« ist, bleibt allerdings noch umstritten).[126] Seit den Untersuchungen der Multi-Society Task Force on PVS wissen wir zwar, dass die Chancen eines Wachkomapatienten, sich zu erholen, drei Monate nach einer atraumatischen oder zwölf Monate nach einer traumatischen Hirnschädigung nahezu null sind. Doch Patienten im irreversiblen Wachkoma sterben zu lassen, ist für alle Beteiligten eine schwierige und heikle Angelegenheit, selbst wenn das ethisch und juristisch gerechtfertigt sein mag.[127]

Schließlich stellt sich auch die Frage, wie der Tod herbeizuführen ist. Werden Flüssigkeitszufuhr und künstliche Ernährung eingestellt, stirbt der Patient in der Regel nach 10 bis 14 Tagen.[128] Aktuelle Studien mit bildgebenden Verfahren lassen den Schluss zu, dass Wachkomapatienten die neuronale Integrationsleistung fehlt, die nach derzeitigem Wissen für eine Schmerzwahrnehmung erforderlich ist.[71] Einige Experten befürworten dennoch die Injektion einer tödlich wirkenden Substanz, um den Sterbeprozess zu beschleunigen. Dies kommt jedoch nur in Ländern mit Regelungen zur Euthanasie, zur aktiven Sterbehilfe, in Frage (zum Beispiel in den Niederlanden und Belgien) und auch nur dann, wenn der Patient dies in einer Patientenverfügung ausdrücklich festgelegt hat.

Wachkomapatienten sind nicht tot, auch wenn ihre Bewusstlosigkeit uns vielleicht glauben macht, sie seien »so gut wie tot«. Dennoch kann es die humanste Option sein, Patienten im irreversiblen vegetativen Zustand sterben zu lassen, genauso wie ein Abort etwa bei Anencephalie vertretbar sein kann, auch ohne dass der Fetus zuvor für tot erklärt wird. Es handelt sich hier nicht um eine rein medizinische Angelegenheit, sondern um eine ethische Frage, deren Beantwortung von persönlichen Wertvorstellungen abhängt. Auch kulturell und religiös bedingt abweichende Haltungen sollten daher respektiert werden.

Fazit und Perspektiven

Hirntote sind somit tot, Patienten im irreversiblen Wachkoma jedoch nicht. Zum Hirntod – definiert als irreversibler Ausfall kritischer Funktionen (neuroendokrine und homöostatische Regulation, Herztätigkeit, Atmung und Bewusstsein) des Organismus als Ganzem – existieren zwei biophilosophische Konzepte, wovon das des Ganzhirntodes gegenüber dem des Stammhirntodes breiter akzeptiert und angewandt wird. Gemessen an den älteren kardiozentrischen Kriterien gelten die seit 1959 genutzten neurozentrischen Todeskriterien[1] als eine der »sichersten der Medizin überhaupt«.[38] Falls weitere Untersuchungen zur Bestätigung des Hirntodes gefordert sind, kann die Irreversibilität des Funktionsverlusts derzeit für den Ganzhirntod verlässlicher belegt werden (etwa anhand der fehlenden Hirndurchblutung) als für den Stammhirntod.[40] Erweiterte technische Möglichkeiten und eine genauere Identifikation des »kritischen Hirnsystems« des Menschen könnten einmal die Kriterien jedoch weiter in Richtung Stammhirntod verschieben.[4]

Meiner Auffassung nach ist die neocorticale Todesdefinition konzeptuell unzureichend und in der Praxis nicht anwendbar. Klinische, elektrophysiologische und bildgebende Untersuchungen sowie Autopsien offenbarten inzwischen eindeutige physiologische und verhaltensbiologische Unterschiede zwischen Hirntod und Wachkoma. Aus ähnlicher Richtung kommende Indizien belegen ebenso überzeugend, dass der neocorticale Tod nicht zuverlässig festzustellen ist und als Todeskriterium nicht ausreicht.

Der Tod ist ein biologisches Phänomen, für das wir schließlich auf Basis gesellschaftlicher Akzeptanz medizinische, ethische und juristische Richtlinien aufgestellt haben.[129] Die Entscheidung, ob ein bestimmter Patient weiterleben soll, beruht auf einer Abwägung von Werten, weshalb Ärzte hier kein spezielles, in ihrer Profession begründetes Recht beanspruchen können. Den demokratischen Traditionen unserer pluralistischen Gesellschaft entsprechend sollte es jedem Individuum freistehen, selbst vorab zu entscheiden, ob im Fall einer schweren Hirnschädigung lebenserhaltende Maßnahmen fortzusetzen oder zu beenden sind. Wie bei den meisten ethischen Fragen gibt es für beide Haltungen plausible Argumente. Diese Kontroversen können und sollen ausgetragen werden, ohne die aktuell etablierte neurozentrische Definition des Todes aufzugeben. Mit Wachkomapatienten das Kollektiv potentieller Organspender zu erweitern ist ein Nutzen, der nicht den gesellschaftlichen Schaden rechtfertigt, der entstehen könnte, weil man das Prinzip des toten Spenders preisgibt.[129]

Viele der Kontroversen um Tod und Sterben von schwer hirngeschädigten Patienten resultieren aus der verbreiteten Verwirrung oder Unkenntnis auf Seiten der Öffentlichkeit und der politischen Entscheidungsträger. Die Medizin ist daher gefordert, die Aufklärung über die neurozentrischen Kriterien und die Diagnostik des Hirntods zu verbessern; Patientenverfügungen als eine Möglichkeit zur vorausschauenden Regelung persönlicher medizinischer Belange zu fördern; klinische Richtlinien zur Praxis weiterzuentwickeln; aktiver die Erforschung physiologischer Effekte zu befördern sowie des therapeutischen Nutzens verschiedener Behandlungsoptionen bei Patienten mit schweren Hirnschäden.

Wie steht es in Zukunft um den Todesbegriff? Bessere Möglichkeiten zu Wiederherstellung oder Ersatz von Hirnfunktionen – man denke an Stammzellen, Neubildung von Nervenzellen, Neuroprothesen, Hirnschutz durch künstlichen Kälteschlaf und nanoneurologische Reparaturen – könnten eines Tages unsere heutigen Vorstellungen zur Irreversibilität der Hirnschädigungen wandeln und Medizin wie Gesellschaft erneut zwingen, die Definition des Todes zu überdenken. ◁

Steven Laureys arbeitet am Zyklotron-Forschungszentrum und in der Abteilung für Neurologie der Universität Lüttich, Sart-Timan-B30, 4000 Liège, Belgien.

E-Mail: steven.laureys@ulg.ac.be

Doi: 1038/nrn1789 (englisches Original)

Alle Indexzahlen im Text verweisen auf die Referenzen der Literaturliste. Diese finden Sie mit weiteren Hinweisen und Links unter www.spektrum.de/hirntod.

AUTOR UND HINWEISE

1956

Künstlicher Mond

»Der Plan der Vereinigten Staaten, in den nächsten zwei bis drei Jahren einen künstlichen Satelliten fertigzustellen und ihn die Erde umkreisen zu lassen, ist durch die offizielle Ankündigung Präsident Eisenhowers vom 29. Juli 1955 in den Mittelpunkt des Weltinteresses gerückt … Unter den verschiedenen Projekten künstlicher Kleinstmonde scheint man sich für die MOUSE entschieden zu haben. Der Entwurf … sieht ein kugel- oder zylinderförmiges Gebilde von mindestens 30 cm Durchmesser und rund 50 kg Gesamtgewicht vor, das von einem dreistufigen Raketenaggregat in eine Bahn zwischen 300 und 500 km Höhe über dem Erdboden befördert werden soll.« *Kosmos, 52. Jg., Nr. 2, S. 66, Februar 1956*

◀ MOUSE soll als erster künstlicher Satellit den Erdball umkreisen.

Rauchen verkürzt das Leben

»Die Arbeit von Hammond und Horn befaßt sich mit dem Einfluß des Rauchens auf die Sterblichkeit im allgemeinen sowie auf die Sterblichkeit an Lungenkrebs und an Erkrankungen der Herzkranzgefäße im besonderen … Männer, die regelmäßig Zigaretten geraucht hatten, wiesen eine viel höhere Sterblichkeit auf als Männer, die niemals Zigaretten geraucht hatten … Die erhebliche Wirkung starken Zigarettenrauchens – ein Päckchen und mehr am Tag regelmäßig – ergibt sich aus folgenden Zahlen: Bei den 50–54jährigen ist die Sterblichkeit um 102 % höher als bei den Nichtrauchern, bei den 55–59jährigen um 86 % und bei den 60–64jährigen sogar um 108 %!« *Kosmos, 52. Jg., Nr. 2, S. 87, Februar 1956*

Blutgefäße aus Textilien

»Wie neuere Untersuchungen ergaben, entscheiden weder die Lebensfrische noch bestimmte biologische Eigenschaften über das ›Angehen‹ eines verpflanzten menschlichen Blutgefäßes. Das verpflanzte Gefäßstück dient dem Empfänger vielmehr nur als provisorischer Blutkanal, aus dem sich allmählich ein neues, körpereigenes Gefäß bildet. In England wurden dünne Schläuche aus dem Kunststoff Orlon in das Gefäßsystem eingenäht. Die Schläuche aus dem Textilgewebe sind nicht ganz undurchlässig, überziehen sich aber bald mit einer dünnen und glatten Fibrinschicht und dichten hierdurch ab.« *Umschau, 56. Jg., Nr. 4, S. 105, Februar 1956*

1906

Drachenflieger auf Rädern

»Der Apparat von Vina ist ein Drachenflieger, dessen tragender Teil von zwei gewaltigen Flügeln aus Seide gebildet wird … Diese werden fest mit einem rechteckigen leichten und starken aus Stahlrohren hergestellten Gestell verbunden, das wiederum selbst auf einem vierrädrigen Chassis ruht … Eine Stahlflasche mit komprimierter flüssiger Kohlensäure wird mit einem Motor in Verbindung gebracht … Dieser überträgt seine Kraft auf eine von Tatin konstruierte Luftschraube … Vina glaubt, dass seine Maschine sich in die Luft erheben wird, wenn sie eine Geschwindigkeit von etwa 60 km per Stunde erreichen kann.« *Allgemeine Automobil-Zeitung, 7. Jg., Nr. 7, Bd. 1, S. 83, Februar 1906*

▲ Der Drachenflieger, von vorn gesehen. Seine Flügel lassen sich nach oben zusammenklappen.

Keimender Kahlkopf

»Die Beseitigung des Kahlkopfes durch ultraviolette Lichtstrahlen … ist Professor Kromener in 33 leichten und schweren Fällen gelungen … Er läßt die Strahlen der Eisenelektroden durch die Oeffnung des gekühlten Schutzschirmes direkt auf die kahle Kopfhaut fallen. Die Zeit der Belichtung variiert nach der Schwere des Falls in Grenzen von einer halben Minute bis fast einer Viertelstunde. Die Hautreaktion äußert sich in Röte und schmerzhafter Blasenbildung, gleichzeitig aber in einem der Entstehung nach dunklen Regenerationsprozesse der scheinbar abgestorbenen Haarwurzeln, die schon nach der zweiten Belichtung sichtbare Keime treiben.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 39, S. 310, Februar 1906*

Das kindliche Gemüt der Frau

»Ueberhaupt hat sich herausgestellt, daß der Kopf beim weiblichen Geschlecht in allen Lebensaltern absolut kleiner ist als beim Manne. Ebenso wie das Gesicht, so ist auch der Kopf und das Gehirn der Frau auf einer mehr kindlichen Entwicklungsstufe stehen geblieben. Im Durchschnitt ist der Mann dem Weibe an geistigen und körperlichen Kräften überlegen. Das Weib hat nicht die Aufgabe, mit dem Manne zu konkurrieren, sondern es soll die in ihm ruhenden, aber durch seine weibliche Organisation und Funktion gehemmten geistigen Fähigkeiten auf Söhne übertragen, bei denen sie sich erst zur höchsten Vollendung entfalten.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 30, S. 239, Februar 1906*

Zweieinhalb Wochen im Ausnahmezustand

Eine »SchülerAkademie« bietet Hochbegabten ein Jahr vor dem Abitur die einzigartige Gelegenheit, in einer Gruppe Gleichgesinnter die eigenen Fähigkeiten bis an die Grenzen auszureizen.

wis
wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.
www.wissenschaft-schulen.de

Von Bernhard Huchzermeyer

Das war eine völlig andere Art zu arbeiten. Ich habe mir nie vorstellen können, wie viel man in zwei Wochen lernen kann.« Viel mehr als diese beiden Sätze waren meinem 17-jährigen Sohn nicht zu entlocken, als er völlig übermüdet von der Deutschen SchülerAkademie in Spetzgart zurückkam. Dann verschwand er erst einmal im Bett, um auszuschlafen.

Einzelheiten erfuhr ich portionsweise in den folgenden Wochen. Neben Erklärungen zu einer zwanzigseitigen Dokumentation seines Kurses waren ihm die vielen neuen Bekanntschaften besonders wichtig: »Man konnte jeden zu jedem Thema ansprechen, und niemand sagte, dass etwas uninteressant sei. Es war einfach toll, abends Sterne zu beobachten und über alles zu reden. Niemand brach ein Gespräch ab, um eine Serie in der Glotze nicht zu verpassen. Und niemand gab zu, dass er müde sei, wenn ein Problem noch nicht gelöst war. Man blieb einfach bis zum Schluss bei der Sache.«

Solche Begeisterung hatte ich nicht erwartet, zumal mein Sohn wegen der SchülerAkademie zwar auf Sommerferien mit der Familie verzichtet hatte, jedoch mit eher gemischten Gefühlen hingefahren war. Aber es kam noch dicker für mich: »Du bietest hier doch auch Veranstaltungen für Schulen an und arbeitest an Schulbüchern. Bewirb dich doch mal in Bonn mit einem interessanten Thema als Kursleiter. Das wird dir gefallen. Du schaffst das bestimmt.«

Inzwischen sind mehr als zehn Jahre vergangen, mein Sohn hat selbst Familie und Kinder, und ich habe an vier SchülerAkademien als Kursleiter und einer weiteren als Akademieleiter teilgenommen. Genau wie mein Sohn habe ich die Offenheit und die natürliche Neugier aller Teilnehmer genossen, mich bis zum Umfallen engagiert und bin todmüde, aber glücklich zurückgekehrt, um von der nächsten Akademie zu träumen.

Der übliche Weg zur Deutschen SchülerAkademie führt über Empfehlungen. Schülerinnen und Schüler erhalten sie in der Regel von ihrer Schule. Kursleiter werden von ehemaligen Kursleitern empfohlen. Oder ein zukünftiger Kursleiter sucht sich einen Partner; denn jeder Kurs wird von einem Zweiergespann betreut.

BERNHARD HUCHZERMEYER

Aus dem Kurs »Materialeigenschaften auf den Grund gegangen« vom Sommer 2002 im Landschulheim Grovesmühle: Während der »Rotation« demonstrieren Kursteilnehmer die Anziehungskräfte zwischen positiv (rote Hütchen) und negativ (gelbe Hütchen) geladenen Ionen im Kristallgitter.

Ich schlug den Organisatoren in Bonn das Kursthema »Energiehaushalt von Zellen« vor, das wurde akzeptiert und ich ging auf Partnersuche. Die einzigen Bedingungen waren: abgeschlossenes Studium; möglichst eine Frau, weil das Geschlechterverhältnis unter Kursleitern ausgeglichen sein soll; und wir sollten beide sicher sein, dass wir während der Akademiezeit auch unter Stress reibungslos zusammenarbeiten würden. Die Bedeutung dieser letzten Bedingung habe ich erst später verstanden.

Kurz vor der Adventszeit gelang es mir, eine Partnerin zu finden, und wir hatten gemeinsam das zunächst grob skizzierte Kursskelett mit Inhalten zu füllen. Jeder der vorgesehenen 16 Teilnehmer sollte in einen Teilaspekt des Themas einführen und den Kurs zu entsprechenden Experimenten anleiten – ohne die Beiträge seiner Vorgänger wirklich zu kennen, denn die Gruppe würde sich erstmalig in der Akademie in Braunschweig treffen. Den Zusammenhang würden wir durch Diskussionen während der Akademie herstellen müssen. Im Übrigen sollten wir uns möglichst aufs Moderieren beschränken.

Das Vorwissen der Teilnehmenden war noch relativ leicht zu ermitteln: In allen Bundesländern gehören die Themen »Die Zelle« und »Photosynthese« zum Pflichtkanon. Aber würden die Teilnehmenden unsere Themenvorgaben akzeptieren und bewältigen? Wie verhalten sich überhaupt begabte Schüler? Wie schnell konsumieren sie angebotene Lehrinhalte? In diesem Punkt hatten wir keinerlei Erfahrung und bekamen von jedem befragten Kollegen eine andere Antwort.

Mit einem Kopf voller Fragen fuhren wir zu dem obligatorischen Vorbereitungstreffen am künftigen Akademiestandort. Dort trafen wir erstmals unsere Kursleiterkollegen und sahen unseren Akademieleiter aus Bonn leibhaftig. Nach den üblichen gruppendynamischen Spielen ging es zur Sache. Wir erfuhren, dass wir von unseren Teilnehmern deutlich mehr Flexibilität und Einsatz erwarten durften, als wir geplant hatten. Wir sollten sie nicht auf kommende Schulthemen vorbereiten, was ihnen auch noch die letzte Herausforderung nehmen würde, sondern sie vor völlig neue, in der Schule nicht behandelte Aufgaben stellen. Okay, wir durften unsere Leute also quälen.

Am Standort, einem Internat für Hochbegabte, begegneten wir dann einem der unbekannten Wesen, mit denen wir konfrontiert sein würden. Der Schüler war 14 Jahre alt und erklärte uns, dass er mit seinem Freund zusammen am Wochenende die Programme verschiedener Schachcomputer analysieren wollte, um sie zu optimieren. Der Schulleiter erläuterte uns, dass seine Schüler das reguläre Pensum in zwei Dritteln der Zeit erledigen und im restlichen Drittel Stoff außerhalb des Lehrplans behandeln. Wer dadurch nicht ausgelastet wird, erlernt zusätzliche Fremdsprachen, bis sein Verhalten demjenigen normal begabter Altersgenossen entspricht. Da wurde uns doch etwas mulmig, und wir beschlossen, für Notfälle ein paar wirklich schwere Fragestellungen mit einzupacken.

BILDUNG UND BEGABUNG E.V.

Reichlich hundert Leute (hier die Teilnehmer der Akademie Braunschweig 2 von 2004) ergeben eine Mischung von ganz eigener Dynamik.

Hochbegabte und Hochangepasste

Während der Vorbereitungszeit, als wir den Teilnehmern die Unterlagen für ihren Beitrag schickten und ihre Themen vorbesprachen, merkten wir, dass sie genauso gespannt und unsicher waren wie wir. Im Nachhinein hat sich herausgestellt, dass uns diese Kontakte sehr geholfen haben, die richtige Einstellung zu unserem Kurs zu finden. Bei unserer Anreise zur Akademie spürten wir nur noch Vorfreude.

Am Abend zuvor versuchten wir, uns die Namen unserer Leute anhand der bei der Anmeldung mitgeschickten Passbilder einzuprägen. Welch weltfremde Idee! Das zarte Knabengesicht auf dem Passbild gehörte zu einem ausgewachsenen Zweimetermann, und die Mädchen anhand von Haarfarbe und Frisur wiederzuerkennen war aussichtslos. Aber alle Mitglieder der SchülerAkademie hatten ihren unverwechselbaren persönlichen Charakter; da fiel das Kennenlernen nicht schwer.

Am ersten Kurstag galt es die Arbeitsplätze einzurichten: viel zu tun und viel zu erklären. Zeit zum Fremdeln gab es nicht, und es entstand sofort eine Arbeitsatmosphäre, in der jeder seinen Aufgabenbereich fand. Natürlich beäugte jeder mit besonderem Interesse das Gerät, das für das eigene Experiment vorgesehen war. Eine Frage konnten wir nie zufrieden stellend beantworten: »Warum ist es relativ einfach, für SchülerAkademien Geräte zu leihen und sich Verbrauchsmaterial schenken zu lassen, während Schulen für den regulären Unterricht die erforderliche Ausrüstung fehlt?« Schon am ersten Abend war es schwierig, den Kursraum um 22 Uhr zu schließen. Man hätte am liebsten sofort alles ausprobiert. Diese Begeisterung blieb bis zum Ende der Akademie erhalten.

Sind unsere »Akademiker« alle so hochbegabt wie das Schachcomputer programmierende Junggenie? Nein. Neben den »echten« Hochbegabten, die ihren Standardschulstoff ohne ersichtliche Anstrengung in sich aufnehmen, gibt es die »Hochangepassten«, die ihre hohen Leistungen selbst entwickelten Lernstrategien verdanken sowie der Fähigkeit, in kürzester Zeit Denk- und Verhaltensschemata der Lehrenden zu analysieren und zu kopieren. Gegenüber den Durchschnittsschülern, die wir aus unserer Arbeit mit Schulklassen kennen, verfügen unsere Kursteilnehmer über ein breiteres Interessenspektrum – und weitaus mehr ▷

▷ Geduld, wenn es schwierig wird. Sie gehen bei der Fehlersuche systematischer vor, wollen verstehen, warum es ein Problem gibt, und suchen nicht gleich nach einer Abkürzung.

Genau diese Eigenschaften waren auch für unseren Kurs gefordert, denn ein roter Faden war darin mit Schulkenntnissen zunächst nicht zu erkennen. Was ist das Gemeinsame an Photosynthese, Zellatmung und Membranpotenzialen in Neuronen?

Im Kursverlauf erarbeiteten unsere Teilnehmer die Primärreaktionen der Photosynthese, die Zellatmung, die Physiologie von Halobakterien und die aktuellen Vorstellungen über den Sehvorgang und die Verarbeitung von Informationen im Gehirn. Neben einfachen Demonstrationsversuchen entwickelten sie schließlich eine Methode, um Membranpotenziale und pH-Gradienten an Biomembranen auch »unter Schulbedingungen« zumindest abzuschätzen. Noch im Kurs gelang es ihnen, das Verfahren so weit zu verfeinern, dass sie zum Beispiel auch die biochemische Wirkungsweise von Pestiziden ermitteln, die Stoffe also klassifizieren konnten.

In den Diskussionen machten wir uns Gedanken darüber, inwieweit Reaktionsabläufe vergleichbar sind: Welche gesundheitlichen Risiken kann man beim Einsatz eines Pestizids vermuten, wenn man weiß, dass es in den Chloroplasten der Pflanzen die Kopplung zwischen Elektronentransport und ATP-Synthese aufhebt? Kann man die entsprechende Vermutung durch ein einfaches Experiment überprüfen?

In einer weiteren Diskussionsrunde ging es um die Evolution der Photosynthese. Wir verglichen Bau und Funktionsweise der Membransysteme von Schwefelbakterien, Blaualgen und höheren Pflanzen. Eine klare Entwicklungslinie ist nicht zu erkennen. Nach der Endosymbiontenhypothese hat ein Vorläufer der heutigen Pflanzen sich photosynthetisch aktive Mikroorganismen einverleibt, aber nicht verdaut. Vielmehr leben die Mikroorganismen in den Chloroplasten moderner Pflanzen fort, mit eigener Hüllmembran, eigenem Genom und eigenem Proteinsyntheseapparat. Bei ihrer Suche nach weiteren Hinweisen stießen die Kursteilnehmer im Internet auf Berichte über Cyanellen, eine Zwischenform zwischen eigenständigem Bakterium und vollständig integrierter Organelle. Das unklare Abstammungsbild konnten wir plausibel dadurch erklären, dass es im Lauf der Evolution eventuell mehrfach zur Aufnahme von Endosymbionten gekommen ist.

Diskussionen unter der Dusche

Das Interesse der Teilnehmer machte an den Kursgrenzen nicht halt: Was machen die anderen denn? Verstehe ich deren Themen überhaupt? Kann man Zusammenhänge zwischen den Themen erkennen oder herstellen? Könnte man einmal eine Einheit gemeinsam gestalten? Beim Frühstück, während sportlicher oder musischer Veranstaltungen am Nachmittag, selbst unter der Dusche: Man war nirgends sicher vor Diskussionen jeder Art.

Aus einer Diskussion am Mittagstisch mit Teilnehmern des Musikkurses ging ein gemeinsames Projekt hervor. Warum werden Töne oft mit Farben umschrieben? Verbinden wirklich alle Menschen gleiche Farbempfindungen mit bestimmten Tonfolgen? Könntet ihr Biologen das erklären? Gibt es im Gehirn »undichte Stellen«, sodass sich Ton- und Farbwahrnehmung mischen können? Der Hinweis auf entsprechende Krankheitsbilder reichte nicht: Es bestand Einigkeit, dass wir gemeinsam experimentieren müssten. Während des kursfreien Nachmittags setzten Biologen die Noten eines kurzen Musikstücks in Farbverläufe um. Die sollten dann die Musiker auf unterschiedlichen Instrumenten wiedergeben. Erst anschließend wurde verraten, worum es sich gehandelt hatte. Die Ähnlichkeiten zwischen der Interpretation der Farbfolgen und dem Abspielen gewöhnlicher Noten waren verblüffend.

Diese Diskussionsrunde wurde auch nach der Akademie weitergeführt. Briefwechsel und gelegentliche Treffs schliefen erst nach mehr als zwei Jahren ein, als die Teilnehmenden sich auf ihr Vordiplom vorbereiten mussten, meine Kurspartnerin ein Kind bekam und ich mich für einige Zeit in den USA aufhielt.

Neben der Musik und dem Herausgeben von Schülerzeitungen war unter

Die Deutsche SchülerAkademie

Seit 16 Jahren finden in jedem Sommer mehrere (zurzeit sieben) SchülerAkademien statt. Die Veranstaltung richtet sich an besonders befähigte und motivierte Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe.

Eine Akademie dauert zweieinhalb Wochen und besteht aus sechs Kursen mit jeweils bis zu 16 Teilnehmern. Jeder Kurs wird von zwei Kursleitern betreut. Während der Akademie arbeitet jeder Teilnehmer in einem Kurs eigener Wahl. Das Niveau der Kurse entspricht dabei häufig demjenigen von Hochschulstudiengängen in den ersten Semestern. Die Kursarbeit wird ergänzt durch sportliche, soziale und kulturelle, insbesondere musikalische Aktivitäten. Während der Akademie leben Teilnehmer und Kursleiter in einer internatsartigen Gemeinschaft zusammen.

Teilnahmeberechtigt sind Schülerinnen und Schüler, die ihre besondere Leistungsfähigkeit und Motivation bereits nachgewiesen haben. Als Nachweis gilt unter anderem eine Empfehlung durch die Schule oder ein Erfolg in einem anerkannten Wettbewerb. Jede Schule, die zum Abitur führt, wird gebeten, einen Schüler oder eine Schülerin zur Teilnahme zu empfehlen. Da sich stets weit mehr Jugendliche für die Kurse bewerben, als Plätze vorhanden sind, trifft die Geschäftsstelle in Bonn eine Auswahl nach pragmatischen Kriterien: ausgeglichenes Geschlechterverhältnis, angemessene Berücksichtigung der Schulen, der Wettbewerbe sowie der Bundesländer.

Die Kosten für die Organisation und Durchführung tragen das Bundesministerium für Bildung und Forschung, der Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft und weitere Förderer. Von den Teilnehmenden wird eine Eigenbeteiligung von 550 Euro erwartet, was etwa den Kosten für Unterkunft und Verpflegung im gastgebenden Internat entspricht. Die Eigenbeteiligung kann bei knappen finanziellen Verhältnissen ermäßigt oder ganz erlassen werden.

Deutsche SchülerAkademie (DSA)
Bildung und Begabung e. V.
Wissenschaftszentrum
Ahrstraße 45
53175 Bonn
Telefon 0228 9591540
Fax 0228 9591519
www.schuelerakademie.de/

CHRISTOPH POPPE / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Übermüdung befällt alle Beteiligten bis hin zum Leiter der Akademie Annweiler 1998, Hans-Werner Hein.

den Teilnehmern die wichtigste Freizeitbeschäftigung die Beteiligung an Sozial- und Umweltorganisationen. Das gab reichlich Stoff für Diskussionen. Als die Sprache auf Anzeiger für Gewässergüte und Schwermetallbelastung von Böden kam, meldete sich ein Schüler zu Wort, der sich selbst bereits ein kleines Labor eingerichtet hatte und dort Umweltansprüche und Stoffwechselleistungen von Kleinlebewesen untersuchte. Er fragte, wie verlässlich denn die angesprochenen Zeigerpflanzen sind, und erprobte schon während der Akademie, wie leicht sich diese Pflanzen bestimmen lassen.

Später setzte er seine neuen Erkenntnisse in seiner Heimatgemeinde in der Eifel um. Er erkannte, dass sich die Vegetation an einem Bachlauf ab einer bestimmten Stelle schlagartig änderte, und traf damit bei dem Sachbearbeiter der zuständigen Behörde auf erhebliches Interesse, weil schon länger ein Verdacht gegen einen Galvanisierbetrieb bestand. Man hatte bisher lediglich Gutachterkosten gescheut und daher kein Verfahren eingeleitet. Immerhin waren die Ergebnisse des Schülers in mehreren Fällen so überzeugend, dass Umweltsünder einen außergerichtlichen Vergleich anstrebten. Inzwischen hat er sein ursprüngliches Hobby zum Beruf gemacht, arbeitet in Sydney in einem Labor für Zellkulturen und schickt mir Fotos aus dem Outback oder von sonnenbeschienenen Stränden, wenn wir in Deutschland gerade Schmuddelwetter haben.

Zur Halbzeit der Akademie ist die »Rotation« angesagt: Um die allgemeine Neugierde zu befriedigen und die Präsentation von Ergebnissen zu üben, stellt jeder Kurs den anderen seine Arbeit vor. Jeweils ein Viertel der Kursteilnehmer bleibt im Raum und präsentiert, während die übrigen Teilnehmer entsprechende Veranstaltungen der anderen Kurse besuchten. Nach vier Durchgängen ist jeder an einer eigenen Vorstellung beteiligt gewesen und hat drei andere Kurse besucht.

In unserem Kurs sorgte die bevorstehende Rotation für erhebliche Unruhe. Man konnte nicht viel am Vortag vorbereiten, da unsere Präparationen aus biologischem Material nicht hinreichend haltbar waren, hatte in den Pausen zwischen den Präsentationsterminen nicht viel Zeit zum Umbau und wollte natürlich ein beeindruckendes Bild abgeben. Man einigte sich schließlich darauf, dass alle vier Gruppen das gleiche Thema vorstellen sollten: Membranvesikel aus Chloroplasten isolieren, daran Membranpotenziale messen und schließlich die Wirkungsweise eines Herbizids erläutern. Die nötigen Vorbereitungen wurden in den Morgenstunden vor der Rotation getroffen, und alle Experimente verliefen völlig problemlos.

Diskrete Lenkung im Hintergrund

Wenn 96 Schülerinnen und Schüler zusammen mit 15 Dozenten an einem Ort zweieinhalb Wochen lang intensiv miteinander arbeiten, ist Organisation erforderlich, und kleine und größere Probleme sind unvermeidlich. Die meisten Probleme, die ich erlebt habe, wurden von den Organisatoren in Bonn zusammen mit der Akademieleitung so elegant abgefangen, dass sie für die Gesamtheit der Teilnehmer nicht einmal sichtbar wurden. Verglichen mit ihren Altersgenossen in regulären Schulklassen sind sie extrem leicht zu führen, weil sie sich selbst ein hohes Maß an Disziplin auferlegen. Dementsprechend ist das häufigste persönliche Problem Übermüdung wegen der ungewohnten Vielfalt der Angebote. Zuweilen gilt es dann, im persönlichen Gespräch den Ehrgeiz auf ein verträgliches Maß herunterzufahren, ohne den Betreffenden in seiner Ehre zu verletzen.

Allerdings gibt es in jeder Akademie Ausnahmesituationen, in denen die Organisation nachgebessert werden muss, Teilnehmende Fehlverhalten zeigen oder Hilfe benötigen, weil sie an die Grenzen ihres Leistungsvermögens gestoßen sind. Auch Kursleiter benötigen gelegentlich Hilfe, wenn der eigene Ehrgeiz oder das Schlafdefizit überhand nehmen. All diese Situationen werden zunächst einmal in der mittäglichen Teamsitzung aufgefangen. Rückblickend halte ich diese Treffen für das wichtigste Steuerungselement, welches das Schiff Akademie überhaupt erst lenkbar macht. Beeindruckt hat mich auch, wie sorgfältig die Organisatoren in Bonn unsere Abschlussberichte analysierten und Konsequenzen daraus zogen. So haben sie trotz der großen damit verbundenen Mühe inzwischen drei mir bekannte Standorte durch neue ersetzt, weil der bisherige Standort, zum Beispiel wegen allzu ablenkender Verlockungen in unmittelbarer Umgebung, sich als ungeeignet herausstellte.

Wie in allen anderen Akademien gab es neben den beiden Leitern des Musikkurses einen dritten Musiker, der in den kursfreien Zeiten an den Nachmittagen und Abenden einen Chor leitete und mit denen, die Instrumente spielten, ein Kirchenkonzert einstudierte. Das wurde am vorletzten Kurstag in der benachbarten Kirche öffentlich aufgeführt. Höhepunkt der Abschlussfeier der Akademie war eine Aufführung von Shakespeares »Sommernachtstraum«, die eine Gruppe von Teilnehmern als Überraschung für die Kursleiter einstudiert hatte.

Gerade am Ende zeigte sich immer wieder, wie sehr sich die Teilnehmenden schon nach zweieinhalb Wochen mit ihrer Akademie verbunden fühlten. Der Abschied verlief stets recht tränenreich, und ich kenne keine Akademie, zu der es nicht innerhalb eines Jahres ein Nachtreffen gegeben hätte. Inzwischen hat sich ein »Club der Ehemaligen« gebildet, dessen Mitglieder den in der Akademie erlebten offenen Umgang miteinander weiter praktizieren und aus dessen Kreis inzwischen die neue Generation von Kursleitern heranwächst. ◁

Bernhard Huchzermeyer ist habilitierter Biologe und geschäftsführender Leiter des Instituts für Botanik der Universität Hannover.

AUTOR

Bessere Suchmaschinen für das Web

Die Onlinesuche im Internet bringt zwar viele, oft aber wenig nützliche Resultate. Nun sollen Websurfer dank verbesserter Software maßgeschneiderte Suchergebnisse erhalten – nicht nur bei Texten, sondern auch bei Bildern und Musikstücken.

Das Wissen der Welt, nur einen Mausklick entfernt: Den Computer (links) wollen seine Eigner für immer vielfältigere Dienste nutzen.

NEIL BRENNAN

Von Javed Mostafa

Seit wenigen Jahren haben Suchmaschinen die Recherche im Internet revolutioniert. Statt in Büchereien zu gehen, um dort mühsam etwas nachzuschlagen, erhalten wir die gewünschten Dokumente heute mit ein paar Tastaturanschlägen und Mausklicks. »Googeln«, nach dem Namen der weltweit dominierenden Suchmaschine, ist zum Synonym für die Online-Recherche geworden. Künftig werden verbesserte Suchmaschinen die gewünschten Informationen sogar noch zielsicherer aufspüren.

Die neuen Programme dringen dazu tiefer in die Online-Materie ein. Sie sortieren und präsentieren ihre Ergebnisse besser, und zur Optimierung der Suche merken sie sich die persönlichen Präferenzen der Nutzer, die sie in vorherigen Anfragen ermittelt haben. Zudem erweitern sie den inhaltlichen Horizont, da sie mehr leisten, als nur eingetippte Schlüsselwörter zu verarbeiten. Einige der neuen Systeme berücksichtigen automatisch, an welchem Ort die Anfrage gestellt wurde. Dadurch kann beispielsweise ein PDA (Personal Digital Assistant) über seine Funknetzverbindung das nächstgelegene Restaurant ausfindig machen. Auch Bilder spüren die neuen Suchmaschinen besser auf, indem sie Vorlagen mit ähnlichen, bereits abgespeicherten Mustern vergleichen. Sie können sogar den Namen eines Musikstücks herausfinden, wenn man ihnen nur ein paar Takte daraus vorsummt.

Heutige Suchmaschinen basieren auf den Erkenntnissen aus dem Bereich des *information retrieval* (Wiederfinden von Information), mit dem sich Computerwissenschaftler schon seit über 50 Jahren befassen. Bereits 1966 schrieb Ben Ami Lipetz im Scientific American einen Artikel über das »Speichern und Wiederfinden von Information«. Damalige Systeme konnten freilich nur einfache Routine- und Büroanfragen bewältigen. Lipetz zog den hellsichtigen Schluss, dass größere Durchbrüche im *information retrieval* erst dann erreichbar sind, wenn Forscher die Informationsverarbeitung im menschlichen Gehirn besser verstanden haben und diese Erkenntnisse auf Computer übertragen. Zwar können Computer dabei auch heute noch nicht mit Menschen mithalten, aber sie berücksichtigen bereits weit besser die persönlichen Interessen, Gewohnheiten und Bedürfnisse ihrer Nutzer.

Bevor wir uns neuen Entwicklungen bei den Suchmaschinen zuwenden, ist es hilfreich, sich ein Bild davon zu machen, wie die bisherigen funktionieren: Was genau ist passiert, wenn »Google« auf dem Bildschirm meldet, es habe in 0,32 Sekunden einige Milliarden Dokumente durchsucht? Es würde wesentlich länger dauern, wenn dabei die Schlüsselwörter der Anfrage nacheinander mit den Inhalten all dieser Webseiten verglichen werden müssten. Um lange Suchzeiten zu vermeiden, führen die Suchmaschinen viele ihrer Kernoperationen bereits lange vor dem Zeitpunkt der Nutzeranfrage aus.

An der Wurzel des Indexbaums

Im ersten Schritt werden potenziell interessante Inhalte identifiziert und fortlaufend gesammelt. Spezielle Programme vom Typ so genannter Webcrawler können im Internet publizierte Seiten ausfindig machen, durchsuchen (inklusive darauf befindlicher Links) und die Seiten an einem Ort gesammelt speichern. Im zweiten Schritt erfasst das System die relevanten Wörter auf diesen Seiten und bestimmt mit statistischen Methoden deren Wichtigkeit. Drittens wird aus den relevanten Begriffen eine hocheffiziente baumartige Datenstruktur erzeugt, die diese Begriffe bestimmten Webseiten zuordnet.

Gibt ein Nutzer eine Anfrage ein, wird nur der gesamte Baum – auch Index genannt – durchsucht und nicht jede einzelne Webseite. Die Suche beginnt an der Wurzel des Indexbaums, und bei jedem Suchschritt wird eine Verzweigung des Baums (die jeweils viele Begriffe und zugehörige Webseiten beinhaltet) entweder weiter verfolgt oder als irrelevant verworfen. Dies verkürzt die Suchzeiten dramatisch.

Um die relevanten Fundstellen (oder Links) an den Anfang der Ergebnisliste zu stellen, greift der Suchalgorithmus auf verschiedene Sortierstrategien zurück. Eine verbreitete Methode – die Begriffshäufigkeit – untersucht das Vorkommen der Wörter und errechnet daraus numerische Gewichte, welche die Bedeutung der Wörter in den einzelnen Dokumenten repräsentieren. Häufige Wörter (wie »oder«, »zu«, »mit«), die in vielen Dokumenten auftauchen, erhalten deutlich niedrigere Gewichte als Wörter, die eine höhere semantische Relevanz aufweisen und nur in vergleichsweise wenigen Dokumenten zu finden sind.

Webseiten können aber auch nach anderen Strategien indiziert werden. Die Linkanalyse beispielsweise untersucht Webseiten nach dem Kriterium, mit welchen anderen Seiten sie verknüpft sind. Dabei wird analysiert, wie viele Links auf eine Seite verweisen und von dieser Seite selbst ausgehen. Google etwa verwendet zur Optimierung der Suchresultate diese Linkanalyse.

Sechs Jahre benötigte Google, um sich als führende Suchmaschine zu etablieren. Zum Erfolg trugen vor allem zwei Vorzüge gegenüber der Konkurrenz bei: Zum einen kann Google extrem große Webcrawling-Operationen durchführen. Zum anderen liefern seine Indizierungs- und Gewichtungsmethoden überragende Ergebnisse. In letzter Zeit jedoch haben andere Suchmaschinen-Entwickler einige neue, ähnlich leistungsfähige oder gar punktuell bessere Systeme entwickelt.

Viele digitale Inhalte können mit Suchmaschinen nicht erschlossen werden, weil die Systeme, die diese verwal- ▷

IN KÜRZE

▶ Da die **Zahl der Webseiten** ständig wächst, benötigen Internetnutzer präzisere Suchmaschinen, die das Gesuchte schneller und effizienter finden.

▶ Die **nächste Generation der Suchmaschinen** wird bessere Ergebnisse liefern, indem sie in die Online-Materialien tiefer eindringt, die Ergebnisse klarer klassifiziert und die persönlichen Interessen der Anwender verfolgt, um bei zukünftigen Anfragen über genaueres Vorwissen zu verfügen. Neuartige Software berücksichtigt zudem den Aufenthaltsort des Nutzers und kann mit Grafik und Musik ebenso gut umgehen wie mit Text.

▶ **Neue kommerzielle Onlinedienste** werden praktisch alle in Digitalform veröffentlichten Informationen – mit Text-, Audio- und Video-Dateien, die derzeit im Web nicht zugänglich sind – mit intelligenten Suchfunktionen verfügbar machen.

▷ ten, Webseiten auf andere Weise speichern, als die Nutzer sie betrachten. Erst durch die Anfrage des Nutzers entsteht die jeweils aktuelle Webseite. Die typischen Webcrawler sind von solchen Seiten überfordert und können deren Inhalte nicht erschließen. Dadurch bleibt ein Großteil der Information – schätzungsweise 500-mal so viel wie das, was das konventionelle Web umfasst – für Anwender verborgen. Doch nun laufen Bemühungen, auch dieses »versteckte Web« ähnlich leicht durchsuchbar zu machen wie seinen bisher zugänglichen Teil.

Zu diesem Zweck haben Programmierer eine neuartige Software entwickelt, so genannte Wrapper. Sie macht sich zu Nutze, dass online verfügbare Information standardisierte grammatikalische Strukturen enthält. Wrapper erledigen ihre Arbeit auf vielerlei Weise. Einige nutzen die gewöhnliche Syntax von Suchanfragen und die Standardformate der Online-Quellen, um auf versteckte Inhalte zuzugreifen. Andere verwenden so genannte Applikationsprogramm-Schnittstellen (APIs), die Software in die Lage versetzen, standardisierte Operationen und Befehle auszuführen. Ein Beispiel für ein Programm, das auf versteckte Netzinhalte zugreifen kann, ist der von BrightPlanet entwickelte »Deep Query Manager«. Dieser wrapperbasierte Anfragemanager stellt Portale und Suchmasken für mehr als 70 000 versteckte Webquellen bereit.

Wenn ein System zur Erzeugung der Rangfolge Links oder Wörter nutzt, ohne dabei zu berücksichtigen, welche Seitentypen miteinander verglichen werden, besteht die Gefahr des Spoofing: Spaßvögel oder Übeltäter richten Webseiten mit geschickt gewählten Wörtern gezielt ein, um das Rangberechnungssystem in die Irre zu führen. Noch heute liefert die Anfrage nach »miserable failure« (»klägliches Versagen«) an erster Stelle eine offizielle Webseite des Weißen Hauses mit der Biografie von Präsident Bush.

Vorsortiert und radförmig präsentiert

Statt einfach nur die gewichtete Ergebnisliste zu präsentieren (die relativ leicht durch Spoofing manipuliert werden kann), versuchen einige Suchmaschinen, unter denjenigen Webseiten, die am ehesten der Anfrage entsprechen, Ähnlichkeiten und Unterschiede zu finden und die Ergebnisse in Gruppen unterteilt darzustellen. Diese Muster können Wörter sein, Synonyme oder sogar übergeordnete Themenbereiche, die nach speziellen Regeln ermittelt werden.

Solche Systeme ordnen jeder gefundenen Linkgruppe einen charakteristischen Begriff zu. Der Anwender kann die Suche dann weiter verfeinern, indem er eine Untergruppe von Ergebnissen auswählt. So liefern etwa die Suchmaschinen »Northern Light« (der Pionier auf diesem Gebiet) und »Clusty« nach Gruppen (Clustern) geordnete Ergebnisse.

»Mooter«, eine innovative Suchmaschine, die ebenfalls diese Gruppiertechnik verwendet, stellt die Gruppen zudem grafisch dar (siehe Grafik links unten). Das System ordnet die Untergruppen-Buttons radförmig um einen zentralen Button an, der sämtliche Ergebnisse enthält. Ein Klick auf die Untergruppen-Buttons erzeugt Listen relevanter Links und zeigt neue, damit zusammenhängende Gruppen. Mooter erinnert sich daran, welche Untergruppen gewählt wurden. Noch genauere Ergebnisse erhält der Nutzer, wenn er die Verfeinerungsoption wählt: Sie kombiniert bei früheren Suchen ausgewählte Gruppen mit der aktuellen Anfrage.

Ein ähnliches System, das ebenfalls visuelle Effekte nutzt, ist »Kartoo«. Es handelt sich dabei um eine so genannte Meta-Suchmaschine: Sie gibt die Nutzeranfragen an andere Suchmaschinen weiter und präsentiert die gesammelten Ergebnisse in grafischer Form. Kartoo liefert eine Liste von Schlüsselbegriffen von den unterschiedlichen Webseiten und generiert daraus eine »Landkarte«. Auf ihr werden wichtige Seiten als Icons (Symbole) dargestellt und Bezüge zwischen den Seiten mit Labeln und Pfaden versehen. Jedes Label lässt sich zur weiteren Verfeinerung der Suche nutzen.

Einige neue Computertools erweitern die Suche dadurch, dass sie nicht nur das Web durchforsten, sondern auch die Festplatte des eigenen Rechners. Zurzeit braucht man dafür noch eigenständige Programme. Aber Google hat beispielsweise kürzlich seine »Desktop Search« angekündigt, die zwei Funktionen kombiniert: Der Anwender kann angeben, ob das Internet, die Festplatte oder beides zusammen durchsucht werden soll.

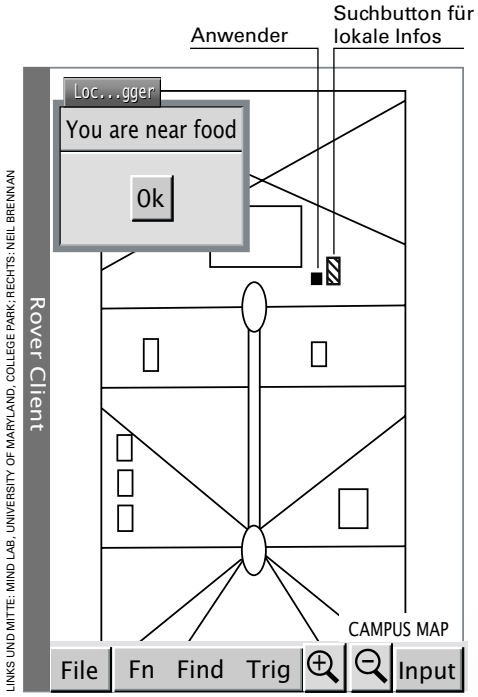
Die nächste Version von Microsoft Windows (Codename »Longhorn«) soll mit ähnlichen Fähigkeiten ausgestattet werden: Longhorn soll die implizite Suche beherrschen, bei der Anwender ohne Eingabe spezifischer Anfragen relevante Informationen auffinden können. (Dabei werden Techniken angewandt, die in einem anderen Microsoft-Projekt namens »Stuff I've seen« – »Sachen, die ich gesehen habe« – entwickelt wurden.)

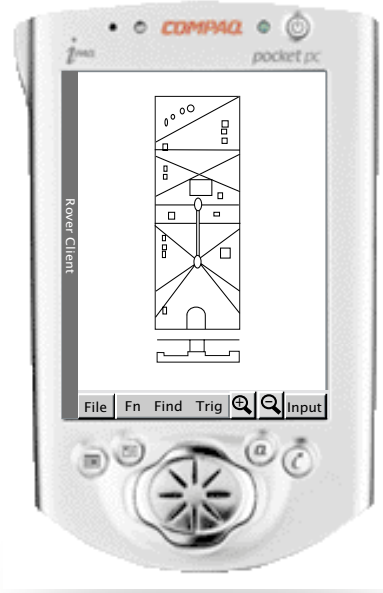
Bei der impliziten Suche werden Schlüsselwörter aus der Textinformation gewonnen, die der Anwender in jüngster Zeit auf dem Rechner verarbeitet oder verändert hat – etwa E-Mails oder Word-Dokumente –, um damit auf der Festplatte gespeicherte Informationen wiederzufinden. Möglicherweise wird Microsoft diese Suchfunktion auch auf Webseiten ausdehnen. Außerdem sollen Anwender auf dem Bildschirm gezeigte Textinhalte leichter in Suchanfragen umsetzen können.

Längst haben auch »Amazon«, »Ask Jeeves« und Google angekündigt, den Nutzern ihrer Suchmaschinen durch personalisierte Anfragen bessere Ergebnisse

WWW.MOOTER.COM

Die neue Suchmaschine »Mooter« erleichtert dem Anwender die Beurteilung der Suchergebnisse, indem sie den Informationen Kategorien zuordnet und verwandte Webseiten grafisch unter jeweils einem Button zusammenfasst. Der zentrale Button mit dem Hauptsuchergebnis ist von Buttons für Unterkategorien umgeben. Klickt man auf einen solchen Button, werden Ergebnislisten aufgerufen und neue Untergruppen erzeugt.





LINKS UND MITTE: MIND LAB, UNIVERSITY OF MARYLAND, COLLEGE PARK; RECHTS: NEIL BRENNAN

Ich weiß, wo wir sind: Ein Computernetz, das über Ortsinformationen verfügt wie das Programm »Rover«, ermöglicht es mobilen Computern in seinem Verbreitungsgebiet, jederzeit ihre Position festzustellen. Damit kann Rover passende Informationen über die jeweilige örtliche Umgebung liefern, hier ein Campus-Gelände (links).

liefern zu wollen. Die Suchmaschinen von Amazon, »A9.com«, und von Ask Jeeves, »MyJeeves.ask.com«, können sich Anfragen und gefundene Seiten eine Zeit lang merken; außerdem können Anwender sie ähnlich wie Lesezeichen permanent speichern. MyJeeves erlaubt, gespeicherte Suchergebnisse durchzusehen und die Suchen nochmals durchzuführen. Dadurch lässt sich eine nach persönlichen Kriterien organisierte Miniversion des Internets erstellen. Amazons A9.com unterstützt ähnliche Suchfunktionen und verwendet ebenfalls die persönliche Suchgeschichte zur Empfehlung weiterer Ergebnisse. Diese Ratgeberfunktion erinnert an Amazons bekannte Auflistung weiterer potenziell interessanter Buchtitel. Sie basiert auf der Analyse der Such- und Kaufgewohnheiten bestimmter Kundengruppen (dies wird auch als »gemeinschaftliches Filtern« bezeichnet).

Auswahl nach Interesse

Sowohl bei A9 als auch bei MyJeeves werden die Suchgeschichten nicht auf dem Computer des Anwenders gespeichert, sondern auf dem Server der Suchmaschinen. Dadurch können sie auch mit anderen Rechnern, an denen die Nutzer arbeiten, aufgerufen und abgespeichert werden. In der personalisierten Version von Google können Anwender Themenbereiche angeben, die für sie besonders interessant sind. Diese sind hierarchisch geordnet, vorgespeichert und müssen nur noch ausgewählt werden. Weiterhin können Nutzer festlegen, in welchem Ausmaß sie sich für die verschiedenen Themen und Bereiche interessieren. Das System berücksichtigt dann – außer der eigentlichen Anfrage – das gewählte Thema sowie den angegebenen Interessegrad, um die Suchergebnisse zu präzisieren und zu sortieren.

Obwohl diese Suchsysteme wesentliche neue Fähigkeiten beherrschen, bringen sie häufig nur graduelle Verbesserungen. Ihr Nutzwert ließe sich deutlich steigern, wenn sie bei einer personalisierten Anfrage auch den größeren Aufgabenkontext berücksichtigen könnten – etwa die früheren Suchbereiche des Anwenders, sein persönliches Verhalten oder Arbeitsthemen. Doch bei der Ermittlung eines solchen Anwenderumfelds müssen Softwareentwickler noch einige Hindernisse überwinden. Die Programme müssen zum einen automatisch die Interessen und Eigenarten der Anwender verfolgen, damit die Suchmaschinen den Kontext der Suchanfrage in Erfahrung bringen können. Zum anderen sollen sie das Computersystem des Nutzers ermitteln sowie seine allgemeinen Gewohnheiten.

Sobald diese Punkte erfasst und in einem Nutzerprofil abgespeichert sind, kann das Programm entsprechend passgenaue Informationen liefern. Doch solche präzisen Anwenderdaten zu gewinnen und zu pflegen könnte sich als schwierig erweisen. Denn die meisten Leute dürften wenig Lust dazu haben, dem System mehr als nur Standardanfragen zu beantworten.

Aussagekräftige Informationen über Interessen eines Anwenders liefern Aufzeichnungen seines Verhaltens beim Websurfen, ebenso seine Nutzung anderer Programme. Wenn jemand Multimediadateien öffnet, liest, abspielt, betrachtet, ausdruckt oder mit anderen Anwendern austauscht, könnte spezielle Software seine Aktivitäten verfolgen und dies dazu benutzen, ihn bei der Suche nach bestimmten Inhalten im Internet zu unterstützen. Das ähnelt von der Funktion her Microsofts impliziter Suche. »PowerScout« und »Watson« sind die ersten Systeme, die in der Lage sind, ihre Suche mit Profilen von Anwenderinteressen zu kombinieren, die sie aus indirekten Quellen gewonnen haben.

Leider stehen solche Laborsysteme der Öffentlichkeit noch nicht zur Verfügung. Programmierer arbeiten derzeit an einer verbesserten Version dieser Software. Sie soll über längere Zeiträume ▷

▷ Interaktionsdaten sammeln und daraus Anwenderprofile erstellen, mit denen potenzielle Nutzerinteressen ermittelt werden können.

Die auf Anwenderprofilen basierende Technik dieser Systeme ist jedoch noch nicht sehr verbreitet. Dafür gibt es mehrere Gründe: Einer könnte in der Schwierigkeit liegen, die Genauigkeit von Nutzerprofilen bei unterschiedlichen Aufgaben und über längere Zeiträume aufrechtzuerhalten. Wiederholte Tests sind erforderlich, um präzise Profile zu gewährleisten. Die Interessenschwerpunkte eines Anwenders können sich unvorhersehbar oder graduell verändern, was sich stark auf die von ihm gewünschten Suchergebnisse auswirken würde.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Datenschutz. Die Geschichte der Webnavigation, gespeicherte Suchergebnisse sowie die Interaktionsschemata bei der Nutzung von Programmen können eine erhebliche Menge persönlicher Information offenbaren, bis hin zur Identifizierung des Anwenders. Es gibt Software, die es Anwendern erlaubt, Inhalte aus dem Netz anonym zu beziehen. Die meisten dieser Werkzeuge bedienen sich zwischengeschalteter Server, den Proxyservern, die Transaktionen der Anwender weiterreichen und verarbeiten. Dadurch kann eine Webseite, die Inhalte oder Daten bereitstellt, nur die Proxyserver erkennen, nicht aber die dahinterstehenden Anwender selbst.

Eigene Profile kontra Datenschutz

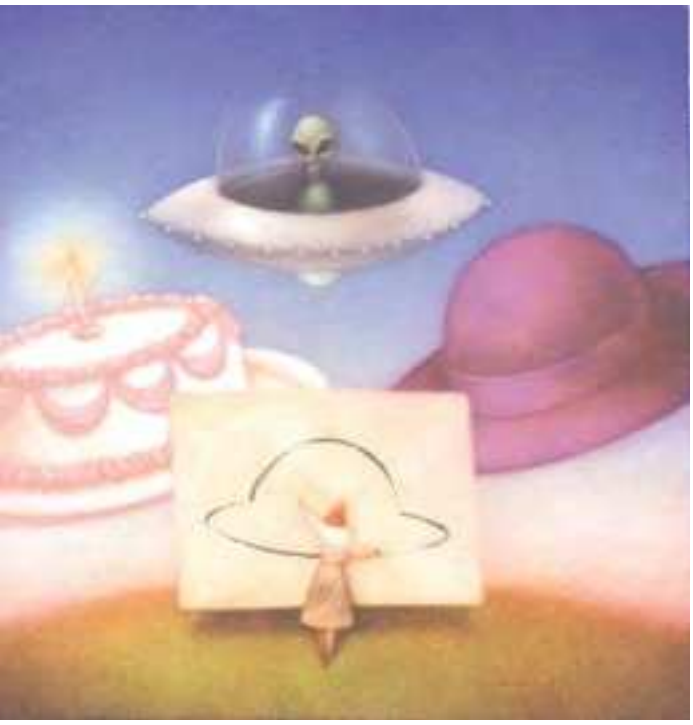
Ein Beispiel für diese Technologie bietet »anomymizer.com«, die ein Inkognito-Websurfen ermöglicht. Ein weiteres Beispiel ist die Software »Freedom WebSecure«, die mehrere Proxyserver und viele Verschlüsselungsebenen anbietet. Diese Tools erhöhen die Sicherheit um einiges. Es gibt zurzeit allerdings noch keine Suchmaschinen, die dem Anwender Personalisierung ermöglichen und gleichzeitig ein hohes Maß an Privatsphärenschutz bieten. Datenschutz mit persönlichen Profilen zu kombinieren bleibt eine Herausforderung.

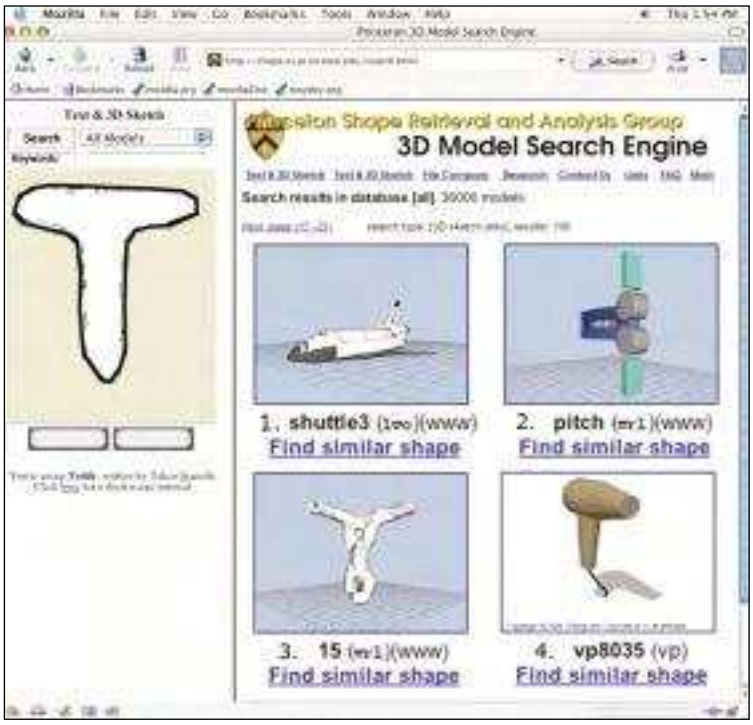
Eine andere Art kontextbewusster Suchsysteme berücksichtigt den momentanen Aufenthaltsort des Anwenders. Hat etwa ein Urlauber einen PDA, der Daten des Global Positioning Systems (GPS) empfängt und seine Position kontinuierlich aktualisiert, so können spezielle Netzwerke Dienste bereitstellen, die darauf eingehen. Gegenwärtig tüfteln Forscher der Universität von Maryland (Baltimore) an dieser Technik: Ihr System namens »Rover« kann in einem weiten geografischen Umkreis auf Text-, Audio- und Videodienste zugreifen (siehe Grafik auf S. 85). Rover ist in der Lage, Umgebungskarten zu erstellen, auf denen für den Anwender potenziell interessante Örtlichkeiten und Einrichtungen hervorgehoben werden. Das System kann diese Punkte automatisch finden, indem es die Karten nach benutzerspezifischen Kriterien filtert.

Rover liefert auch weiterführende Informationen. Besucht ein Rovernutzer beispielsweise ein Museum, könnte sein PDA für jedes Stockwerk den Grundriss mit allen Ausstellungsstücken zeigen. Verlässt er das Museum, würde das PDA-Display auf den Umgebungsplan umschalten und dort relevante Örtlichkeiten darstellen. Rover erlaubt weiterhin, dass der Nutzer seine Position manuell eingibt und zugehörige Informationen aus der Netzwerkdatenbank bezieht. 2003 hatten die Gründer von Rover und »KoolSpan« Fördermittel erhalten, um Anwendungen für die verschlüsselte drahtlose Datenübertragung und zur Anwenderidentifikation zu entwickeln.

Leider ist die Ortungsungenauigkeit der GPS-Systeme (drei bis vier Meter) noch immer recht groß. Zwar kann die Auflösung durch Sensoren in Innenräu-

▼ **Auf der Suche nach der Form: Die 3-D-Modell-Suchmaschine der Arbeitsgruppe zur Formsuche und Formanalyse der Princeton-Universität sucht zu Formvorlagen im Internet passende Bilder mit ähnlichen Formen.**





LINKS: NEIL BRENNAN; RECHTS: THOMAS FUNKHOUSER, PRINCETON SHAPE RETRIEVAL AND ANALYSIS GROUP

men und durch Signalsysteme im Freien verbessert werden, doch die sind teuer. Ein weiteres Problem: Die Übermittlung nichttextlicher Information – vor allem Bilder, Audio und Video – erfordert höhere Übertragungsbandbreiten, als PDAs verarbeiten und deren Netzwerke bereitstellen können. Das Protokoll für lokale drahtlose Netzwerke, IEEE 802.11b, weist eine Bandbreite von bis zu 11 Megabit pro Sekunde auf. Tests zeigten, dass dies ausreicht, um ortsbezogene Suchdienste zur Verfügung zu stellen. Allerdings ist das Protokoll noch nicht sehr verbreitet.

Die persönlichen Interessen des Nutzers und seine gegenwärtige Position sind aber nicht alles. Suchmaschinen beantworten neuerdings nicht nur Textanfragen, sondern liefern auch grafisches Material. Im Internet stehen bereits viele dreidimensionale Bilder zur Verfügung. Doch Künstler, Illustratoren und Designer können diese Informationen nicht effektiv mittels Schlüsselwörtern auffinden. Die Suchmaschine »3-D Model Search Engine« von der Arbeitsgruppe zur Formsuche und Formanalyse der Princeton-Universität (New Jersey) kann auf dreierlei Weise nach solcher Information suchen (siehe Grafik links).

Wie finde ich ein Lied?

Bei der ersten Methode verwendet der Anwender ein Grafikpad namens Teddy, mit dem er einfache zweidimensionale Formen darstellen kann. Die Software erzeugt daraus dann virtuelle Suchmuster, indem sie die 2-D-Bilder durch den Raum zieht. Bei der zweiten Methode zeichnet der Anwender zweidimensionale Formen (wie unterschiedliche Projektionen eines Bilds), und die Suchmaschine vergleicht diese »flachen« Vorlagen mit 13 vorgespeicherten Projektionen, die sie von jedem 3-D-Objekt in ihrer Datenbank hat. Theoretisch ließe sich dies so ausweiten, dass die Suche mit allen Arten von zweidimensionalen Bildvorlagen möglich wird. Die dritte Methode schließlich besteht darin, ein Dokument hochzuladen, das ein 3-D-Modell enthält.

Das noch in der Entwicklung befindliche System ordnet Anfragen Formen zu, indem es zunächst eine jede als Serie mathematischer Funktionen beschreibt. Für dreidimensionale Bilder verwendet es harmonische Funktionen, für zweidimensionale Bilder trigonometrische. Anschließend erzeugt das System von jeder Funktion so genannte »kugelförmige« oder »kreisförmige« Signaturen, die als Fingerabdruckwerte oder kurz Fingerabdrücke bezeichnet werden. Die Verwendung dieser Deskriptoren bringt zwei Vorteile: Zum einen können sie von Computern schnell verarbeitet und verglichen werden; zum anderen funktioniert die Suche unabhängig davon, wie das Original und die Suchvorlage zueinander orientiert sind.

Auch Musik hat in der Welt der Suchmaschinen Einzug gehalten. Das größte Problem bei der Suche nach einem Musikstück besteht darin, wie man die Suchanfrage am besten formuliert. Eine Möglichkeit besteht in der Eingabe von Musiknoten – oder einer auf Transkriptionen basierenden Suchsprache, die es dem Nutzer erlaubt, eine Melodie durch Eingabe alphanumerischer Zeichen zu beschreiben. Den meisten Anwendern bereitet es jedoch Schwierigkeiten, ein Stück, das sie im Kopf haben, in Notenform darzustellen. ▷

NEW ZEALAND DIGITAL LIBRARY PROJECT, UNIVERSITY OF WAIKATO

NEIL BRENNAN

Welche Melodie ist es? Es fällt nicht jedem leicht, eine Internet-Suchanfrage für ein Musikstück zu formulieren. Das System Meldex, entwickelt im Rahmen des Digitalen Büchereiprojekts von Neuseeland, erlaubt es Anwendern, eine teilweise erinnerte Melodie in das Computermikrofon zu summen; alternativ kann er Teile von Songtexten in die Tastatur tippen. Die Suchmaschine findet das gesuchte Musikstück dann blitzschnell.

Das System Meldex, entwickelt im Rahmen des Digitalen Büchereiprojekts von Neuseeland, bietet eine Reihe von Möglichkeiten, Musik ausfindig zu machen (siehe Abbildungen oben). Bei der ersten kann der Nutzer eine Anfrage aufnehmen, indem er die Töne auf dem virtuellen Keyboard spielt. Zweitens kann er die Melodie in das Computermikrofon summen. Drittens kann der Anwender Teile aus dem Songtext als Textsuchanfrage eingeben oder diese mit einer melodiebasierten Suche kombinieren.

Um das Meldex-System funktionsfähig zu machen, mussten die Forscher aus Neuseeland verschiedene Hindernisse überwinden:

- die musikalische Suchanfrage in eine Form umwandeln, die von Computern leicht verarbeitet werden kann;
- Musikstücke digital speichern und durchsuchbar machen;
- die Anfragen den gespeicherten Musikdaten zuordnen.

In einem Quantisierung genannten Schritt findet das System automatisch die Tonhöhe des Eingangssignals. Es untersucht dazu die Struktur der Wellenformen und ordnet sie digitalen Noten zu. Das System speichert sowohl Noten als auch komplette Werke in einer Datenbank für Musikstücke. Durch Verwendung spezieller Algorithmen, die Datensequenzen miteinander vergleichen, ist Meldex in der Lage, zu musikalischen Suchanfragen in Notenform entsprechende Noten in der Datenbank für Musikstücke zu finden. Da die Anfragen Fehler enthalten können, muss der Datenvergleich fehlertolerant ablaufen.

Zukünftige Suchdienste werden nicht auf konventionelle Computerplattformen beschränkt bleiben. Ingenieuren ist es bereits gelungen, sie in Automobile zu integrieren. Voraussichtlich werden auch Spielekonsolen, Fernseher oder High-End-Stereoanlagen mit solchen Suchfunktionen ausgestattet. Auf diese Weise bieten Suchtechnologien – vor allem mit Hilfe intelligenter Internetdienste – ungeahnte Hilfeleistungen etwa beim Autofahren, Musikhören und beim Produktdesign.

Unsichtbares Data-Mining

Große Veränderungen wird die Internetsuche auch durch neuartige kommerzielle Onlinedienste erleben. Diese haben das Ziel, das vorhandene Angebot an publiziertem Text-, Video- und Audiomaterial, auf das Computernutzer derzeit nur eingeschränkt zugreifen können, in weitaus größerem Umfang als bislang zur Verfügung zu stellen.

Die nächste Generation der Suchmaschinen wird bei der Erledigung ihrer anspruchsvollen Aufgaben zugleich weniger und stärker sichtbar sein als bislang. Der sichtbare Teil umfasst leistungsfähigere Tools, die Suchfunktionen mit so genannten Data-Mining-Operationen kombinieren. Data-Mining-Systeme suchen in Datenbeständen nach speziellen Zusammenhängen, ohne ihre Bedeutung zu kennen. Der unsichtbare Teil besteht in der Entwicklung von Myriaden intelligenter Suchoperationen, die in unterschiedlichen Anwendungen und auf unterschiedlichen Plattformen als Hintergrunddienst laufen. Fortschritte beim Data-Mining sowie verbesserte Benutzerschnittstellen werden es einem einzelnen System ermöglichen, ein ganzes Spektrum an anspruchsvollen Suchdiensten automatisch zur Verfügung zu stellen, die nahtlos in interaktive visuelle Software integriert sind.

Programmierer werden visuelle Miningsoftware entwickeln. Dazu kombinieren sie Fortschritte im maschinellen Lernen und in den Klassifikationstechniken so miteinander, dass Webinhalte besser verstanden werden können. So wird die Suche sehr viel transparenter und interaktiver. Analysten erwarten, dass eine ganze Reihe von Miningfunktionen zur Verfügung stehen werden, die jeweils auf die Inhalte eines speziellen Fachgebiets abgestimmt sind (etwa Musik oder biologische Daten).

Softwareentwickler werden die Wünsche der Anwender möglichst schnell und bequem erfüllen, obwohl sie tatsächlich mit riesigen Informationsmengen umgehen. Websurfer werden voluminöse Datenbestände durchforsten – mit opulenten visuellen Schnittstellen, die darauf abzielen, große Komplexe an Information zu finden statt einzelner, zusammenhangloser Einträge. So wird es für die Anwender letztendlich doch wieder schwierig zu bestimmen, wo die Suche beginnt und wo das Verständnis einsetzt.

Javed Mostafa ist Victor H. Yngve Associate Professor für Informationswissenschaft an der amerikanischen Indiana-Universität (Bloomington). Er leitet das Laboratory of Applied Informatics Research in Indiana.

A search engine for 3D models. Von T. Funkhouser et al. in: ACM Transactions on Graphics, Bd. 22, Nr. 1, S. 83, 2003

Simulation studies of different dimensions of users' interests and their impact on user modelling and information filtering. Von Javed Mostafa et al. in: Information Retrieval, Bd. 6, Nr. 2, S. 199, 2003

Weblinks zu den im Text erwähnten Internetseiten finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Pocken in Portland – simuliert

Wie breiten sich Seuchen aus? Mit Simulationsprogrammen lassen Forscher Epidemien in virtuellen Städten ausbrechen, um herauszufinden, wie im Ernstfall reagiert werden sollte.

Von Chris L. Barrett,
Stephen G. Eubank und James P. Smith

Nehmen wir an, Terroristen hätten Pesterreger in Chicago freigesetzt, und die Gesundheitsbehörde hätte rasch zu entscheiden, wie sie ihr knappes Personal und ihre begrenzten Mittel am effektivsten einsetzt. Wäre die Ausgabe von Antibiotika an alle Einwohner der beste Weg, um den Ausbruch einer Epidemie zu verhindern? Oder eine Massenquarantäne?

Ein anderes Szenario: Man hätte die Chance, eine weltweite Influenza-Pandemie im Keim zu ersticken, indem man alles, was die Industrieländer an Medikamenten gegen Viren vorrätig haben, in die primär betroffene Region in Asien schickt. Soll man das tun? Wenn der Kraftakt Erfolg hat, ist eine weltweite Krise abgewendet; wenn nicht, stehen die Geberländer so gut wie schutzlos da.

Entscheidungen dieser Art sind von ungeheurer Tragweite. Das Leben von Tausenden, ja Millionen Menschen hängt von ihnen ab, von den wirtschaftlichen und sozialen Folgen ganz zu schweigen. Aus der Geschichte können die Verantwortlichen nur sehr begrenzt lernen. Die Methoden, mit denen man in den 1970er Jahren die letzten Pockenfälle in afrikanischen Dörfern unter Kontrolle brachte, sind wahrscheinlich nicht die geeignetsten, um einen Ausbruch dieser Krankheit in einer Großstadt des 21. Jahrhunderts einzudämmen.

Es gilt also, sich bereits vor dem Auftreten einer Krankheit die besten Vorgehensweisen für eine Vielzahl möglicher Situationen zurechtzulegen. Dazu benötigen die Verantwortlichen so etwas wie einen Sandkasten, in dem man Ernstfälle aller Art so wirklichkeitsnah wie möglich durchspielen kann. Zu diesem Zweck hat unsere Forschungsgruppe am Nationallaboratorium Los Alamos (LANL) ein epidemiologisches Simulationsmodell namens EpiSims entwickelt, welches das Verhalten der Bevölkerung bis auf die einzelne Person genau abbildet. Es handelt sich um das größte Modell dieser Art.

Diese bisher nicht erreichte Detailtreue erlaubt es, über die bloße Schätzung der wahrscheinlichen Anzahl infizierter Personen hinauszugehen; sie gestattet uns, die vorrangigen Ausbreitungswege einer Krankheit in der Population zu finden und dadurch festzustellen, wie der Ausbruch einer Epidemie am wirksamsten eingedämmt werden kann. Das Netz unserer alltäglichen Kontakte – Begegnungen am Arbeitsplatz, beim Einkaufen oder zu Hause – ist dasselbe, über dessen Maschen auch ansteckende Krankheiten von Mensch zu Mensch springen. Indem wir dieses soziale Geflecht mit großer Genauigkeit wiedergeben, können wir seine Struktur erfassen und dadurch auch herausfinden, wo man es gezielt unterbrechen muss, um die Verbreitung einer Krankheit aufzuhalten, ohne das Funktionieren des täglichen Lebens übermäßig zu beeinträchtigen.

Cholera in London

Die Epidemiologie ist älter als die Kenntnis der Krankheitserreger. Als ihr Gründer gilt der Londoner Arzt John Snow (1813–1858). Er hatte vermutet, dass sich die Cholera, an der innerhalb von zwanzig Jahren Zehntausende von Menschen in England gestorben waren, über die Wasserversorgung ausbreitete. Ein Ausbruch im Londoner Stadtteil Soho im Sommer 1854 gab ihm Gelegenheit, seine Vermutung zu erhärten. Auf einer Karte markierte er zu jedem der 500 Menschen, die in den letzten zehn Tagen an der Krankheit gestorben

ADEPT VORMGEVING

Die Simulation von sozialen Interaktionen, durch die Krankheiten übertragen werden, zeigt, wie sich Krankheitserreger von einer Einzelperson aus (im Kreis) in einer Population ausbreiten könnten.

waren, dessen Wohnhaus. Außerdem ermittelte er durch Befragen der Hinterbliebenen, dass sämtliche Verstorbenen Wasser aus der Pumpe in der Broad Street getrunken hatten. Auf Grund dieser Ergebnisse ließen die Zuständigen den Schwengel der Pumpe entfernen, woraufhin die Epidemie zum Erliegen kam.

Noch heute ist die Verfolgung der Aktivitäten und Kontakte jedes einzelnen Krankheitsopfers, wie Snow sie uns vorgemacht hat, eine wichtige Methode der Epidemiologie. Auch die Verwendung mathematischer Modelle als Entscheidungshilfe für Gesundheitsbehörden ist nicht neu. Nur die Kombination von beidem ist bisher kaum praktiziert worden. Die genannten mathematischen Modelle fassen in aller Regel große Gruppen von Menschen zu Kollektiven zusammen; diese »aggregierten Variablen« sind dann die Rechengrößen, die in der Modellierung verwendet werden. Für eine genauere Wiedergabe der Realität fehlte den Modellierern bisher sowohl die Rechenkapazität als auch die Detailkenntnis über den Ansteckungsprozess und das Muster sozialer Kontakte. Alles, was von diesen komplizierten Vorgängen in das Modell einging, war die »Reproduktionszahl« einer speziellen Krankheit; das ist die durchschnittliche Anzahl von Personen, die sich bei einem Erkrankten oder an einem verseuchten Ort anstecken. Diesen Wert gewinnt man aus der Erfahrung mit früheren Epidemien, auch wenn diese unter völlig anderen kulturellen, sozialen und hygienischen Verhältnissen stattfanden.

Das beeinträchtigt zweifellos die Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Denn wie viele unter den gefährdeten Personen sich in einer Epidemie tatsächlich anstecken, hängt von deren Gesundheitszustand, der Dauer und der Art ihres Kontakts mit Infizierten sowie Eigenschaften des Erregers selbst ab. Für aussagefähigere Modelle müssen diese Einzelheiten daher in den angesetzten Wert für die Übertragungswahrscheinlichkeit eingehen. Dazu sind nicht nur die Merkmale der Krankheit und der Gesundheitszustand jeder einzelnen Person, sondern auch die Interaktionen beliebiger Personen der Gruppe systematisch in die Untersuchung einzubeziehen. ▷

IN KÜRZE

- **Epidemiologische Simulationsprogramme** wie EpiSims stellen virtuelle Laboratorien bereit, mit denen Gesundheitsbehörden die Effizienz unterschiedlicher Vorgehensweisen bei Krankheitsausbrüchen im Voraus prüfen können.
- **Das Programm modelliert die Bewegungen jedes Menschen** in einer großen Population und liefert damit ein dynamisches Bild des sozialen Netzes, über das sich ansteckende Krankheiten verbreiten.
- **Die Kenntnis der Wege**, die eine Krankheit innerhalb einer Gesellschaft nehmen könnte, gibt den Verantwortlichen die Möglichkeit, das Netz der unmittelbaren Kontakte durch Maßnahmen wie Schulschließungen, Quarantäne oder gezielte medizinische Behandlung von Schlüsselpersonen zu beeinflussen.

▷ Bislang umfassen epidemiologische Modelle dieser Art nur sehr kleine Gruppen von etwa 100 bis zu 1000 Personen. Das liegt vor allem daran, dass sie echte Populationen nachbilden, zum Beispiel alle Bewohner, Mitarbeiter und Besucher eines Pflegeheims. Dazu müssen detaillierte Informationen über diese Personen und deren Kontakte über Tage oder Wochen aufgezeichnet werden, was sehr aufwändig ist. Und selbst bei so relativ wenigen Menschen ist die Anzahl ihrer möglichen Kontakte so hoch, dass ihre Berechnung auf technische Schwierigkeiten stößt.

Unsere Gruppe war in der Lage, ein epidemiologisches Modell dieser Art mit Millionen simulierter Einzelpersonen zu konstruieren. Die nötige Rechenleistung stellte ein Supercomputer – ein so genannter Clusterrechner – bereit; für die konzeptuelle Arbeit konnten wir auf einem bereits bestehenden Modell namens »Transims« aufbauen, das mehr als zehn Jahre lang in Los Alamos für Zwecke der Stadtplanung entwickelt worden war.

Transims sollte Auskunft darüber geben, wie beispielsweise die Bewohner einer Stadt ihre Fahrtrouten ändern würden, wenn eine Straße neu gebaut oder verlegt würde. Dazu mussten die individuellen Bewegungen einer großen Anzahl von Menschen in einem realistischen städtischen Umfeld in das Modell eingebaut werden – und das war genau das, was wir brauchten, um die Interaktionen von Millionen von Einzelmenschen zu simulieren. Wir nannten unser Modell »EpiSims«.

Inzwischen kann EpiSims an die Verhältnisse in verschiedenen Städten angepasst werden. Transims dagegen war ursprünglich nach dem Vorbild von Portland (Oregon) gebaut. Die virtuelle Version dieser Stadt enthält einen detaillierten digitalen Stadtplan einschließlich Bahnlinien, Straßen, Ampeln, Verkehrsvorschriften und so weiter und berechnet das Verkehrsaufkommen und die Fahrzeiten für verschiedene Tageszeiten. Aus allgemein verfügbaren Daten machten die Autoren von Transims 180 000 unterschiedliche Aufenthaltsorte, eine synthetische Bevölkerung von 1,6 Millionen Einwohnern und realistische tägliche Aktivitäten dieser Menschen, die sie in das System eingaben (Kasten rechts). Damit haben sie die bisher beste Annäherung an die Kontaktmuster großer menschlicher Populationen erreicht.

Annes soziales Netz

Mit EpiSims können wir nun ein Mitglied dieser Gemeinschaft mit einem Krankheitserreger ausstatten, dessen Ausbreitung beobachten und die möglichen Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen studieren. Selbst wenn dieser gedachte Erreger das Leben seiner Opfer gar nicht verändert, ermöglicht das Modell faszinierende Einblicke in soziale Netze mit potenziell wichtigen Konsequenzen für die Bekämpfung von Epidemien.

Was ist ein soziales Netz, und wozu verwenden es die Epidemiologen? Schauen wir uns ein Mitglied unserer synthetischen Gesellschaft näher an, sagen wir eine erwachsene Frau namens Anne. Beim Frühstück trifft sie die übrigen Mitglieder ihrer Familie, und auf dem Weg zur Arbeit hat sie Kontakt mit anderen Fahrgästen in der U-Bahn oder im Auto der Fahrgemeinschaft. Während der Arbeit trifft sie vielleicht Dutzende von Menschen, und zwar sind diese Kontakte je nach der Art ihrer Arbeit mehr oder weniger lang und intensiv. Beim Mittagessen oder bei einem Einkaufsbummel nach der Arbeit könnte Anne weitere flüchtige Kontakte mit Fremden an öffentlichen Plätzen haben, bevor sie nach Hause zurückkehrt.

Grafisch können wir Annes Kontakte durch ein Netz darstellen, in dessen Zentrum sie sich befindet und in dem eine Linie sie mit jedem ihrer Kontaktpartner verbindet (Kasten S. 94). Jeder Mensch, den Anne trifft, geht seinen Aktivitäten nach und begegnet weiteren Personen. Diese »Kontakte der Kontakte« können wieder durch Linien dargestellt werden, die zum Beispiel Annes Kollegen Robert mit jeder Person verbinden, der er begegnet. Bis auf diejenigen, die Anne direkt trifft, sind Roberts Kontaktpersonen zwei »Sprünge« von Anne entfernt. Die Anzahl von Sprüngen entlang einer kürzesten Verbindung zwischen zwei Personen wird als »Graphabstand« oder auch »Trennungsgrad« der beiden bezeichnet.

Der beliebte Spruch, dass jeder auf der Welt mit jedem anderen über höchstens sechs Personen bekannt ist, läuft darauf hinaus, dass in dem Netz, das aus allen Menschen auf der Welt besteht, kein Graphabstand größer ist als 6. Das stimmt zwar nicht ganz, ist aber auf jeden Fall eine romantische Idee.

Wenn man zwischen zwei Mathematikern genau dann einen Strich zieht, wenn die beiden gemeinsam eine Arbeit veröffentlicht haben, entsteht ein ziemlich großes Netz mit einer prominenten Zentralfigur: Der geniale Mathematiker Paul Erdős (1913–1996) hat mit ungeheuer vielen Koautoren gemeinsame Arbeiten publiziert. Den Graphabstand eines beliebigen Mathematikers von Paul Erdős nennt man spaßeshalber dessen Erdős-Zahl.

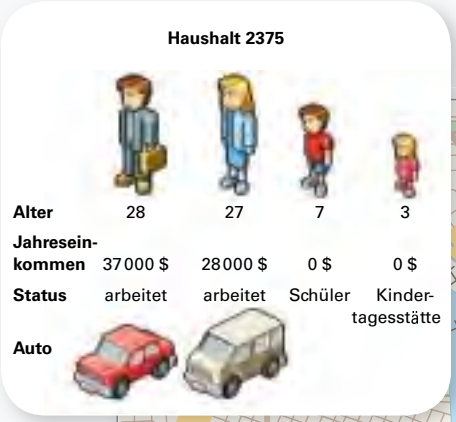
Ein »Kontakt« ist es auch, wenn Websites im Internet aufeinander verweisen, Wissenschaftler einander in ihren Veröffentlichungen zitieren oder Moleküle in einer lebenden Zelle miteinander reagieren. Alle diese Netze neigen dazu, Zentralfiguren (*hubs*, wörtlich »Naben«) auszubilden: Gewisse Knoten des Netzwerks verfügen über eine außergewöhnlich große Zahl von Verknüpfungen mit dem übrigen Netzwerk. Typischerweise verläuft auch die kürzeste Verbindung zweier beliebiger Knoten

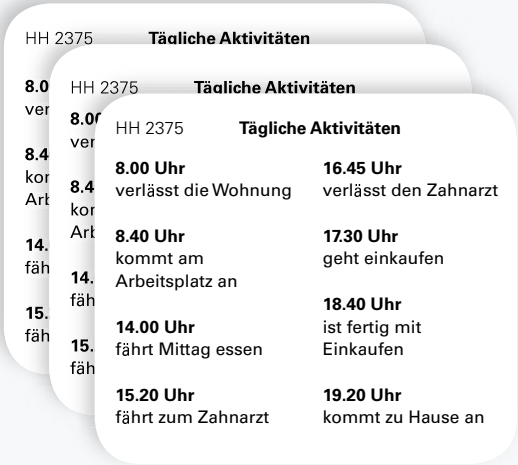
Eine synthetische Bevölkerung

Das Modell EpiSims war in seiner Urfassung eine Nachbildung der Stadt Portland (Oregon) – keine wirklich getreue, denn die Lebensgewohnheiten von über 1,6 Millionen Menschen aufzuzeichnen wäre überaus mühsam und zudem ein massiver Eingriff in die Privatsphäre gewesen. Gleichwohl konnte mit Hilfe allgemein verfügbarer Daten eine synthetische Bevölkerung geschaffen werden, die statistisch nicht von der echten zu unterscheiden ist.

Synthetische Haushalte

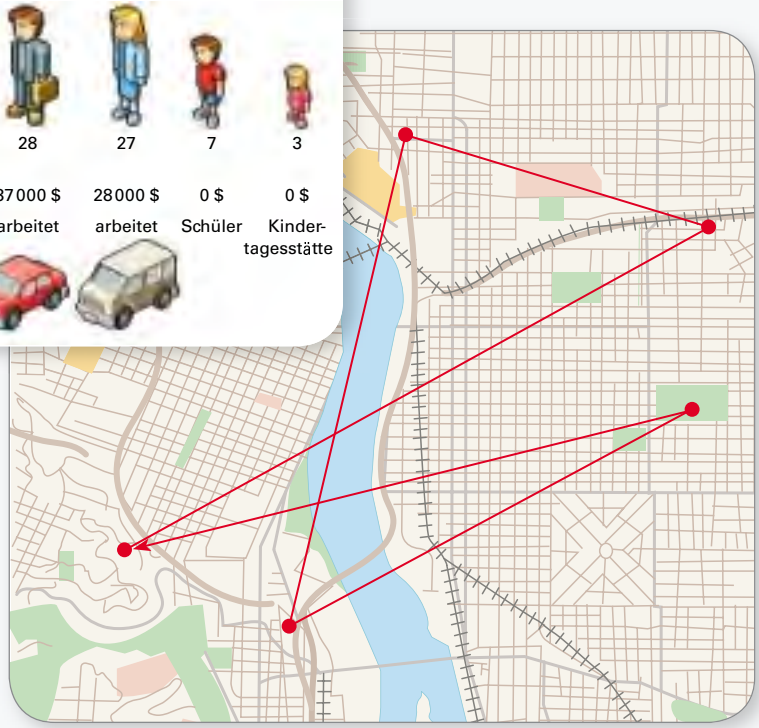
Das statistische Bundesamt der USA (U. S. Census Bureau) stellte demografische Angaben wie Alter, Zusammensetzung der Haushalte und Einkommen für die gesamte Stadt zur Verfügung. Darüber hinaus hat das Amt kleinere Bezirke sehr eingehend erfasst und auch diese Daten teilweise bereitgestellt. Durch Hochrechnen dieser Detailangaben auf die gesamte Stadt entsteht eine »künstliche Bevölkerung« mit statistisch korrekter Verteilung von Alter, Haushaltsgröße und weiteren Merkmalen.





Aktivitäten

Die meisten Stadtplanungsbüros erfassen den innerstädtischen Verkehr durch detaillierte Befragung weniger tausend Personen. Für diese Stichprobe werden die Bewegungen jedes einzelnen Haushaltsmitglieds während eines oder mehrerer Tage mitsamt Zeitpunkt aufgezeichnet. Das so ermittelte Aktivitätsmuster wird unter Berücksichtigung von Alter, Geschlecht und Familiensituation auf die künstliche Gesamtbevölkerung übertragen.



Orte

Jede Bewegung braucht ihren Ausgangs- und ihren Zielpunkt. Verfügbar sind Daten darüber, wie häufig über den Tag hinweg gewisse Gebäude, Parkplätze, Parks und andere Orte besucht werden. Daraus wurden in dem Modell 180 000 »Zielorte«. Wer aus der künstlichen Bevölkerung wann welchen Zielort aufsucht, bestimmten die Autoren von Transims, dem Vorläufer von EpiSims, durch Kriterien wie »Wer arbeitet, fährt zum Arbeitsplatz«, »Schulkinder gehen zur Schule« und »Zum Einkaufen oder zur Freizeitbeschäftigung wählt man von mehreren gleichwertigen Möglichkeiten die nächstgelegene«.

KARTE: LUCY READING-IKKANDA; FIGUREN: ADEPT VORMGEVING

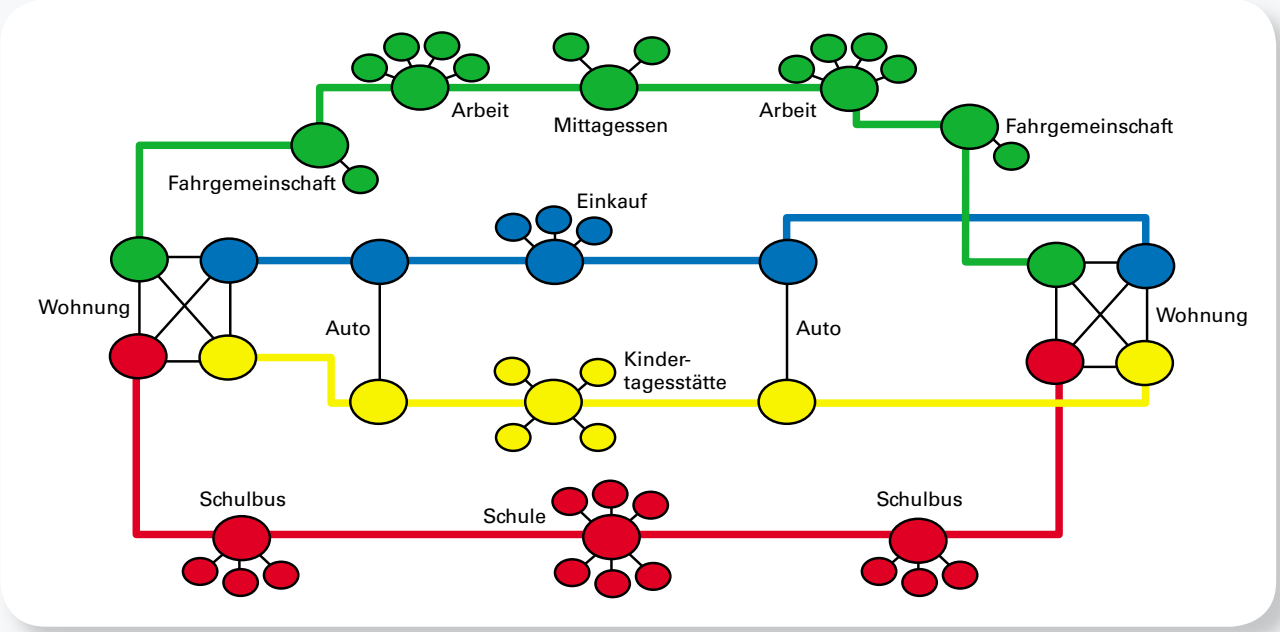
des Netzwerks durch eine Nabe, ganz ähnlich wie beim Streckenschema einer kommerziellen Fluggesellschaft. Man nennt solche Netzwerke »skalenfrei«, wenn die Anzahl $N(k)$ der Naben mit genau k Verbindungen proportional zu einer Potenz von k ist (Spektrum der Wissenschaft 7/2004, S. 62).

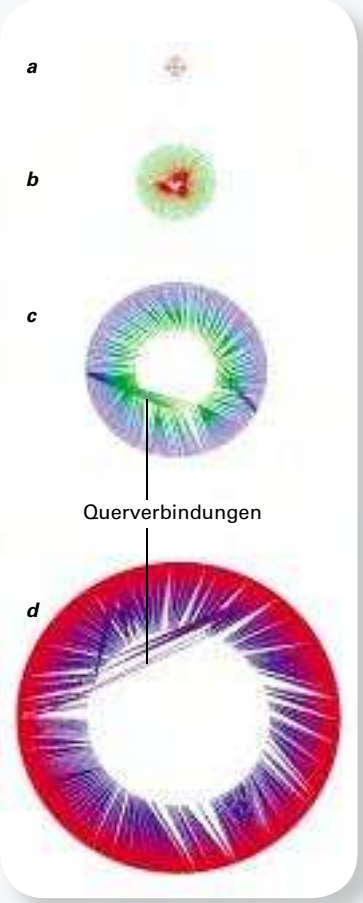
Ein skalenfreies Netzwerk kann beträchtlichen Schaden nehmen, sobald eine oder mehrere seiner Naben funktionsunfähig werden. Einige Forscher haben versucht, diese Beobachtung auf die Ausbreitung von Krankheiten zu übertragen. Könnte man infizierte »Naben-Personen«, das heißt die kontaktfreudigsten Mitglieder einer Gemeinschaft, ausfindig machen und behandeln beziehungsweise isolieren, so die Überlegung, dann ließe sich eine Epidemie vielleicht eindämmen, ohne dass eine umfassende Quarantäne verhängt oder eine Massenimpfung durchgeführt werden muss. Allerdings deuten unsere Untersuchungen im Rahmen von EpiSims darauf hin, dass sich eine menschliche Gemeinschaft nicht so leicht lahm legen lässt wie bestimmte Infrastruktursysteme.

In der Tat ist unser nachgemachtes Portland (und das echte wahrscheinlich auch) eine skalenfreie Struktur mit bestimmten Orten wie Schulen und Einkaufszentren als Naben. Es würde also ▷

Soziale Netze knüpfen

Nehmen wir einen Durchschnittshaushalt mit zwei Erwachsenen und zwei Kindern. Das folgende Diagramm gibt ein erstes grobes Bild ihrer Aktivitäten: Es zeigt, wohin die Mitglieder des Haushalts gehen und was sie den Tag über tun, macht aber kaum klar, wie ihre »Kontaktpersonen« ihrerseits untereinander und mit anderen Kontakt haben.

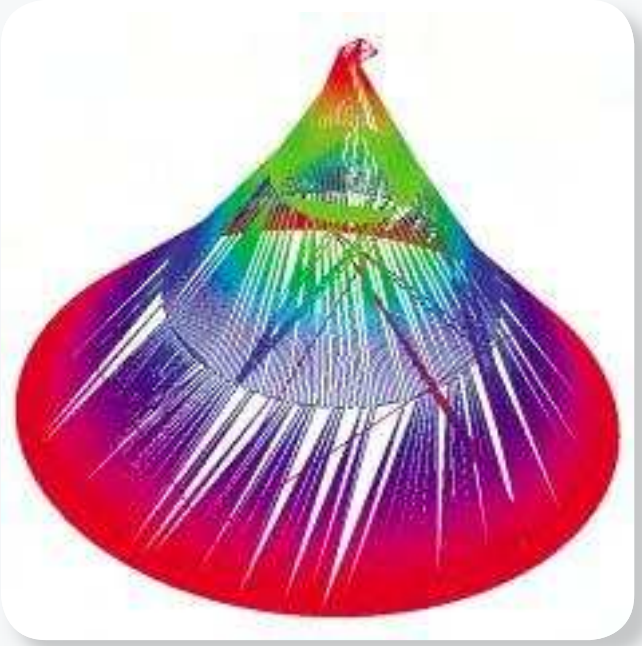




Das soziale Netz des Haushalts besteht zunächst aus den Linien, welche die Mitglieder des Haushalts miteinander *(a)* und mit ihren unmittelbaren Kontaktpersonen *(b)* verbinden. Im nächsten Schritt werden diese Personen mit ihren eigenen Kontaktpersonen verbunden *(c)*, diese mit den ihrigen *(d)* und so weiter. Unter den Angehörigen des so heranwachsenden Netzes gibt es Querverbindungen. Aber niemand in diesem Netz weist mehr als 15 direkte Kontakte auf. Eine »Zentralfigur«, über die ein erheblicher Teil der Kontakte läuft, gibt es also nicht.

Die Ausbreitung einer Krankheit würde dadurch gehemmt, dass man eine Zentralfigur aus dem Verkehr zieht – wenn es eine gäbe. In dieser Gemeinschaft wäre eine solche Maßnahme wenig hilfreich: Die Krankheit hat von einer Person zu einer beliebigen anderen stets Ersatz-Übertragungswege zur Auswahl.

Die Anzahl der Mitglieder dieses kleinen Netzes erweitert sich mit jeder Kontaktgeneration auf ein Vielfaches. Entsprechend rasant würde sich in dieser Population eine ansteckende Krankheit ausbreiten.



OBEN: LUCY READING-IKKANDA; UNTEN: STEPHEN G. EUBANK

▷ Sinn machen, an diesen Orten Überwachungssysteme für Krankheitserreger oder biologische Kampfstoffe zu installieren – wenn es solche Systeme gäbe. Es gibt auch »Nabenpersonen«, insbesondere Leute, die an Nabenorten arbeiten, wie Lehrer oder Kassiererinnen. Daneben haben wir aber auch eine überraschend hohe Zahl »kurzer Wege« in den sozialen Netzwerken festgestellt, die durch keine einzige Nabe verlaufen. Eine Strategie, die allein auf Nabenindividuen ausgerichtet ist, würde also zur Eindämmung einer Massenerkrankung in der Stadt wenig beitragen.

Ein Mensch hat »über vier Ecken« mit 10000 anderen Kontakt. Was ist, wenn er die Pocken hat?

Vielmehr fanden wir in realistischen sozialen Netzwerken eine weitere unerwartete Eigenschaft: Bis auf ein paar fanatische Einzelgänger ist im Grunde jeder eine kleine Nabe. Die Anzahl der Kontakte jeder einzelnen Person weicht nur wenig von einer Durchschnittsanzahl ab, und es gibt kaum geschlossene Gemeinschaften von Personen, die keine oder nur sehr wenige Außenkontakte haben. Das heißt auch: Mit jedem zusätzlichen Sprung vergrößert sich das soziale Netz auf ein Vielfaches. Es sieht aus wie ein Kegel, dessen Breite mit jedem Sprung zunimmt (Kasten links).

Impfung oder Quarantäne?

Für die Epidemiologie bedeutet das: Ansteckende Krankheiten verbreiten sich exponentiell, das heißt, mit jeder Stufe der Ansteckung vervielfacht sich die Anzahl der Infizierten. Im Ernstfall ist daher der wesentliche Faktor, der über Erfolg oder Misserfolg einer Maßnahme entscheidet, die Geschwindigkeit, mit der sie durchgeführt wird. Durch die Simulation mit EpiSims können wir herausfinden, ob diese These zutrifft.

Eine der ersten Anwendungen unseres Programms, kurz nach Beginn der Entwicklungsarbeiten im Jahr 2000, war die Modellierung eines Pockenausbruchs. Offizielle Stellen fürchteten, dass Bioterroristen in einer Stadt der USA Pockenerreger freisetzen würden, suchten Rat und bekamen gelegentlich widersprüchliche Empfehlungen. Wäre im Ernstfall eine Massenimpfung nötig, um einer Epidemie vorzubeugen? Oder reicht es aus, sich bei der Impfung allein auf die Betroffenen und ihre Kontaktpersonen zu konzentrieren? Wie effektiv wäre eine umfassende Quarantäne? Wären diese Maßnahmen mit dem vorhandenen Personal im Gesundheitswesen, bei der Polizei und anderen Stellen überhaupt durchführbar?

Wir machten uns also daran, die Übertragung von Pocken in unserer künstlichen Gemeinschaft zu simulieren. Das war ungewöhnlich schwierig, weil das Virus seit seiner Ausrottung in den 1970er Jahren keinen Menschen mehr befallen hat. Aber einige Fakten sind bekannt und weit gehend unumstritten: Die Übertragung des Virus erfordert in der Regel intensiven körperlichen Kontakt mit einer infizierten Person oder einem von dieser verunreinigten Gegenstand. Nach einer Inkubationszeit von durchschnittlich zehn Tagen treten grippeähnliche Symptome auf, gefolgt von Hautausschlag. Ab diesem Zeitpunkt ist der Erkrankte ansteckend, möglicherweise sogar schon eine gewisse Zeit, bevor das Fieber beginnt. Ohne Behandlung sterben etwa 30 Prozent der Infizierten, die übrigen erholen sich und sind gegen eine neue Infektion immun.

Durch eine Impfung vor oder bis zu vier Tage nach der Infektion kann ein Ausbruch der Pocken verhindert werden. In all unseren Simulationen nehmen wir an, dass das medizinische Personal und die Leute, die einen Infizierten nach seinen Kontakten zu fragen haben, bereits geimpft wurden, also immun sind. Im Unterschied zu anderen epidemiologischen Modellen hält unsere Simulation auch die zeitliche Reihenfolge ein. Wenn Anne sich heute mit Fieber ins Bett legt, kann sie nicht vor einer Woche ihren Kollegen Robert angesteckt haben. Oder falls Anne Robert ansteckt, nachdem sie sich selbst infiziert hat, und Robert die Krankheit an seine Tochter Jennifer überträgt, dann kann zwischen der Infektion von Anne und der von Jennifer nicht weniger als das Doppelte der minimalen Inkubationszeit liegen.

Nachdem unser Krankheitsmodell ausgearbeitet und jedem Mitglied unserer synthetischen Population ein Immunstatus – geimpft oder ungeimpft – zugewiesen worden war, setzten wir virtuelle Pockenviren an mehreren Nabenorten der Stadt frei, darunter einem Universitätsgelände. Dadurch wurden 1200 Personen ohne ihr Wissen infiziert. Binnen Stunden hatten sie sich, ihren normalen Aktivitäten nachgehend, durch die ganze Stadt bewegt.

Daraufhin simulierten wir verschiedene offizielle Maßnahmen, darunter eine Impfkampagne für alle Einwohner der Stadt einerseits und die selektive Erfassung und Impfung oder Isolierung der Infizierten und ihrer Kontaktpersonen andererseits. Außerdem ließen wir zum Vergleich das Modell ohne jede Maßnahme laufen. Wir berechneten den Verlauf der Ereignisse – mit beiden Arten von Maßnahmen – auch für den Fall, dass vom Bekanntwerden des ersten Krankheitsfalls bis zur Umsetzung der Maßnahmen vier, sieben oder zehn Tage vergehen. Zusätzlich bauten wir die Möglichkeit ein, dass sich Angesteckte selbst isolieren, indem sie zu Hause bleiben.

Jede Simulation dauerte virtuelle 100 Tage (Kasten auf der nächsten Seite). ▷

Sind Sie auf folgenden Messen?

didacta die Bildungsmesse — 20.–24.02.06 Halle 16, G16

CeBIT — 09.–15.03.06 Halle 09, C04

HANNOVER MESSE — 24.–28.04.06 Halle 02, A51

Dann schauen Sie doch einfach einmal beim Spektrum-Stand vorbei. Wie immer halten wir für unsere Abonnenten eine kleine Überraschung bereit.

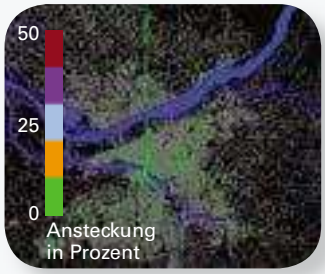
Die simulierte Katastrophe – in mehreren Varianten

Die Simulationssoftware EpiSims stellt den Verlauf eines Krankheitsausbruchs und die Auswirkungen behördlicher Maßnahmen in Form eines Films dar. Die Bilder unten sind solchen Filmen entnommen. Säulen stellen die Anzahl der infizierten Personen am betreffenden Ort dar, die Farben zeigen den Anteil der Ansteckenden unter ihnen. In den beiden abgebildeten Szenarien werden die Pocken in einer Universität im Zentrum von Portland freigesetzt. Die Krankheit wird allerdings erst bemerkt, als die ersten Betroffenen 10 Tage später erste Symptome bemerken. Die linke Bildreihe zeigt den Verlauf der Epidemie ohne jede Maßnahme, die rechte unter der Annahme, dass Infizierte und ihre Kontaktpersonen geimpft und unter Quarantäne gestellt werden. Die Ergebnisse einer Reihe derartiger Simulationen (Grafik unten) zeigen, dass die größte Verminderung der Todesfälle dadurch bewirkt wird, dass sich die Erkrankten frühzeitig in ihre Wohnungen zurückziehen. Zweitwichtigster Faktor war die Geschwindigkeit, mit der offizielle Maßnahmen ergriffen werden, unabhängig von der Art der Maßnahme.

Tag 1: Unbemerkte Freisetzung von Pocken

keine Maßnahme

1281 Infizierte,
keine Toten



**gezielte Impfung
und Quarantäne ab Tag 14**

1281 Infizierte,
niemand in Quarantäne,
niemand geimpft,
keine Toten

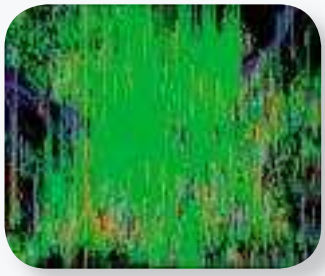
Tag 35: Pocken-Epidemie

23 919 Infizierte,
551 Tote

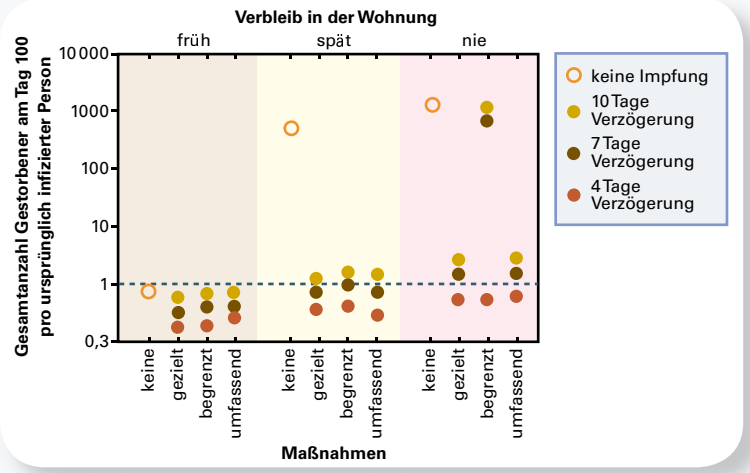
2564 Infizierte,
29 910 in Quarantäne,
30 560 Geimpfte,
312 Tote

Tag 70: Epidemie eingedämmt oder auch nicht

380 582 Infizierte,
12 499 Tote



2564 Infizierte,
36 725 in Quarantäne,
37 207 Geimpfte,
435 Tote



Effizienz der Maßnahmen

Die Simulationen sehen vor, dass ein Mensch zu Hause bleibt, weil er sich krank fühlt oder offiziellen Weisungen folgt. Das kann geschehen, bevor der Betreffende ansteckend wird (»früh«), 24 Stunden, nachdem er ansteckend wird (»spät«), oder »nie«, das heißt, der Erkrankte bewegt sich weiter in der Stadt, bis er stirbt. Ein früher Rückzug nach Hause unterbindet sogar ohne weitere Maßnahmen eine Epidemie. Die offiziellen Maßnahmen sind – abgesehen vom Nichtstun – die gezielte Impfung und Quarantäne mit unbegrenzt vorhandenem Personal, dieselbe Aktion mit der halben Wirksamkeit wegen Personalmangels und die umfassende Impfung der gesamten Bevölkerung. Diese Maßnahmen beginnen vier, sieben oder zehn Tage, nachdem sich bei den ersten Personen Symptome zeigen.

SIMULATIONEN: PHILLIP ROMERO, LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY; DIAGRAMM: LUCY READING-IKKANDA

▷ Am Ende steht bei jeder Simulation eine genaue Anzahl von Toten; aber diese Zahl ist weniger aussagekräftig als die relativen Unterschiede zwischen verschiedenen Simulationsläufen. Die Ergebnisse bestätigen die Vorhersage, zu der wir auf Grund der Struktur des sozialen Netzes gelangt sind: Zeit ist der bei Weitem wichtigste Faktor für einen glimpflichen Ausgang. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Menschen selbst in ihre Wohnungen zurückziehen oder durch die Gesundheitsbehörden isoliert werden, hat den stärksten Einfluss auf das Ausmaß der Ansteckung. Der zweitwichtigste Einflussfaktor ist die Dauer der Verzögerung bei der offiziellen Reaktion. Die Art der Maßnahme ist dagegen weniger bedeutend.

Im Fall eines Pockenausbruchs wäre also eine breit angelegte Impfkampagne mit den ihr eigenen Risiken unzweckmäßig. Gezielte Impfungen wären ebenso effektiv, solange die Krankheit rasch entdeckt und dann schnell darauf reagiert wird. Beim Ausbruch einer sehr ansteckenden Krankheit ist insbesondere eine rasche und entschlossene Durchsetzung von Quarantänemaßnahmen geboten.

Unsere Ergebnisse hängen naturgemäß von der Art der Krankheit und den Rahmenbedingungen ab. In einer anderen Simulation haben wir studiert, was geschieht, wenn über Chicago Pesterreger freigesetzt werden, die mit der Atemluft in den Menschen gelangen. Es stellte sich heraus, dass Kontakterfassung, Schulschließungen und Absperrungen in der Stadt bei Kosten in der Größenordnung von Milliarden Dollar kaum mehr Nutzen bringen als die – erheblich preisgünstigere – massenhafte freiwillige Einnahme rasch verfügbarer Antibiotika.

Die Vogelgrippe droht – was tun?

Die neueste Anwendung von EpiSims haben wir im Rahmen eines Projekts namens Midas (*Models of Infectious Disease Agent Study*, Erforschung von Modellen für Erreger von Infektionskrankheiten) erarbeitet, das vom National Institute of General Medical Sciences, einem der nationalen Gesundheitsinstitute der USA, organisiert wurde. Dabei geht es um die Simulation einer natürlich vorkommenden Krankheit, die den gesamten Planeten bedrohen könnte: pandemische Influenza.

Im letzten Jahr hat ein äußerst gefährlicher Stamm von Grippeviren unter den frei lebenden und den von Menschen gehaltenen Vögeln Asiens gewütet. Mehr als 40 Menschen in Japan, Thailand und Vietnam wurden davon infiziert, mehr als 30 sind bereits gestorben. Die Weltgesundheitsorganisation WHO befürchtet, dass es nur eine Frage der Zeit ist, bis diese tödliche Grippeart mit dem Namen H5N1 so mutiert, dass sich Menschen leichter mit ihr infizieren und sie direkt von Mensch zu Mensch übertragen werden kann. Eine solche Entwicklung könnte zu einer weltweiten Influenza-Pandemie führen; die mögliche Zahl der Opfer wird auf viele Millionen Menschen geschätzt (Spektrum der Wissenschaft 1/2006, S. 72).

Es kommt nicht so sehr darauf an, was man im Fall einer Epidemie tut; Hauptsache schnell!

Im Rahmen von Midas soll untersucht werden, ob und wie ein von Mensch zu Mensch übertragbares H5N1-Virus durch rasches Eingreifen kontrolliert oder sogar ausgerottet werden kann, solange es noch auf eine kleine Population beschränkt ist. Dazu haben wir mit EpiSims eine hypothetische südostasiatische Gemeinschaft mit 500 000 Einwohnern modelliert, die in Bauernhöfen und Kleinstädten lebt. Unser Modell des Grippevirus selbst beruht sowohl auf historischen Daten über Stämme, die Influenza-Pandemien ausgelöst haben, als auch auf Informationen über das H5N1-Virus, dessen Biologie gerade intensiv erforscht wird.

Zum Beispiel wissen wir, dass H5N1 empfindlich auf Medikamente reagiert, die eines seiner wichtigen Enzyme hemmen, die so genannte Neuraminidase. In unseren Simulationen wird angenommen, wir könnten Neuraminidase-Hemmer sowohl für die Behandlung als auch für die Prophylaxe einsetzen. (Ein Impfstoff gegen H5N1 ist bereits entwickelt und wird derzeit im Menschenversuch getestet. Weil der Impfstoff jedoch weder erprobt noch verfügbar ist, konzentrieren wir unsere Modellrechnungen auf die Frage, ob die Antiviren-Medikamente zusammen mit traditionellen Maßnahmen des Gesundheitswesens eine Epidemie beenden könnten.)

Inzwischen haben im Rahmen des Programms Midas Ira Longini von der Emory-Universität in Atlanta (Georgia) und Neil Ferguson vom Imperial College in London konkrete Ergebnisse von Simulationsrechnungen vorgelegt: Wenn es gelingt, die Infektion zu entdecken, bevor 30 Menschen erkrankt sind, und die 20 000 dem Infektionsherd räumlich am nächsten lokalisierten Menschen prophylaktisch zu behandeln, bleibt die Epidemie begrenzt, bei Opferzahlen um 200. Ab 40 Erkrankten wird die Eindämmung zunehmend schwieriger.

Die Entwicklung von Modellen wie Transims, die Bewegungen von Menschen in städtischen Umgebungen simulieren, war der Durchbruch auf dem Gebiet der Informatik, der EpiSims erst ermöglicht hat. Epidemiologie ist nur eine der potenziellen Anwendungen dieser Art von Modellen. Wir arbeiten auch an Simulationen anderer Systeme, um virtuelle Laboratorien für eine Fülle von Problemen zur Verfügung zu stellen: Umwelt- und speziell Luftverschmutzung, Telekommunikation, Transport, Warenmärkte, Wasserversorgung und Stromnetze. ◁

Chris L. Barrett, Stephen G. Eubank (Foto) und James P. Smith haben fünf Jahre lang im Los Alamos National Laboratory (LANL) an der Entwicklung der Simulationssoftware EpiSims gearbeitet. Barrett, der schon das Vorgänger-Projekt Transims leitete, ist Direktor des Simulation Science Laboratory am Virginia Bioinformatics Institute (VBI) in Blacksburg. Der Physiker Eubank ist stellvertretender Direktor dieses Labors und war Leiter der EpiSims-Gruppe in Los Alamos. Smith, ebenfalls Physiker, arbeitet an einem anderen Nachfolgeprojekt von Transims am LANL.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Drugs, quarantine might stop a pandemic before it starts. Von Martin Enserink in: Science, Bd. 309, Nr. 5736, 5. August 2005

Containing pandemic influenza with antiviral agents. Von Ira M. Longini Jr. et al. in: American Journal of Epidemiology, Bd. 159, Nr. 7, S. 623, 2004

Modelling disease outbreaks in realistic urban social networks. Von Stephen Eubank et al. in: Nature, Bd. 429, S. 180, 13. Mai 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

MATHEMATIK

Rudolf Taschner

Der Zahlen gigantische Schatten

Mathematik im Zeichen der Zeit

2., verbesserte Auflage, Vieweg, Wiesbaden 2005. 200 Seiten, € 39,90

Religion, Musik, Kalender, Astronomie, Zahlsysteme, Algorithmen, Statistik, Quantenphysik und Transzendenz: Rudolf Taschner, Professor am Institut für Analysis und Scientific Computing der Technischen Universität Wien, führt uns ein Kaleidoskop vor. Fassettenreich, bunt, schillernd, mit jeder Änderung der Perspektive eine neue Gestalt annehmend gewährt das Buch Einblicke in die faszinierende Vielfalt unseres Umgangs mit der Zahl. Mit dem Kaleidoskop teilt der Text auch die – gewollte und wohl auch dem Charakter angemessene – Beschränkung auf die Schau fantasievoller, in all ihrer Komplexität doch überaus geordneter Muster, die dem Auge wohlgefällig sind, aber über den Effekt hinaus nur begrenzte Einblicke gestatten.

Für jedes der acht Kapitel hat Taschner eine historische Person gewählt, die für das Thema einen Leitgedanken vorgibt. Allgemein gibt er Beiträgen, Ansichten und Haltungen bedeutender Wissenschaftler breiten Raum. Das Verständnis komplexer Theorien erleichtert er durch die kritische Auseinandersetzung mit dem Prozess ihrer Entstehung.

Gelungen erscheinen die Kapitel »Hofmannsthal: Zahl und Zeit« mit den Hauptthemen Zeitmessung und Kalendersysteme, »Descartes: Zahl und Raum«, der das Messen von Längen und Flächen, Karten und Koordinaten behandelt, »Laplace: Zahl und Politik«, in dem Wahrscheinlichkeiten und Statistiken, wie sie uns täglich als Argument für oder gegen gewisse Entscheidungen begegnen, kritisch betrachtet werden, und »Pascal: Zahl und Geist«, in dem es um die Möglichkeiten und Grenzen des menschlichen Denkens geht.

Das Kapitel »Leibniz: Zahl und Logik« erläutert sehr anschaulich unterschiedliche Systeme zur Darstellung von Zahlen, speziell das binäre, das in Computern eine entscheidende Rolle spielt. Wer sich auf logische Strenge und die formale Beschreibung von Computern und ihrer Vorgehensweise einzulassen bereit ist, wird zu den mathematisch und philosophisch bedeutenden Resultaten von Kurt Gödel und Alan Turing geführt.

Weniger gelungen ist dagegen »Bach: Zahl und Musik«. Es ist richtig, Johann Sebastian Bach hat in etlichen seiner Werke Zahlensymbolik betrieben; Taschners Spekulationen gehen aber wohl doch zu weit. Der Autor unterscheidet nicht klar zwischen den hörbaren Tönen und ihren Beziehungen einerseits und deren mathematischen Modellen andererseits. So kann man durchaus mit einer gewissen Berechtigung die Töne der chromatischen Skala in ein zweidimensionales Schema bringen, dessen Achsen von der Quint und der großen Terz aufgespannt werden. Es ist jedoch Unfug, deshalb die Musik »zweidimensional« zu nennen und zu behaupten, dass »Musik genau genommen unendlichdimensional« sei.

»Bohr: Zahl und Materie« beginnt mit einer gut lesbaren Schilderung wichtiger Abschnitte der Entstehung der Quantenphysik. Die Entdeckung des Bildungsgesetzes für die Spektrallinien des Wasserstoffatoms durch Johann Balmer (1825–1898) ist eine historisch interessante Anekdote, deren mathematischer Gehalt leicht zu vermitteln ist. Aber es wäre dem Thema eher angemessen gewesen, hätte Taschner die Beziehungen zwischen Wellenmodell, statistischer Interpretation und Superpositionsprinzip einerseits und der Erweiterung des Zahlbegriffs auf die komplexen Zahlen andererseits behandelt.

Leben wir am Rand einer »Hohlwelt«? Wenn man unterstellt, dass Lichtstrahlen auf Kreisbahnen durch den Mittelpunkt der Hohlwelt verlaufen, ist die abstruse Theorie widerspruchsfrei.

Das Buch enthält viele, überwiegend sehr schöne Abbildungen. Einige davon sind nicht klar genug erläutert oder in den Text eingebunden. Höchst unerfreulich ist die Entscheidung, dem 175 Seiten umfassenden Text insgesamt 163, zum Teil sehr lange Anmerkungen auf weiteren 27 Seiten hinzuzufügen. Die Lesbarkeit des Textes würde sicher deutlich verbessert, wenn die kürzeren in die Form von Fußnoten gebracht und die längeren inhaltlich in den eigentlichen Text aufgenommen würden. Ein Index, den ich schmerzlich vermisst habe, ist in der 2. Auflage hinzugefügt worden. Aber nach wie vor fehlen jegliche Literaturangaben, die dem angeregten Leser vertiefende Diskussionen vermitteln könnten.

Insgesamt bleibt der Eindruck, dass der Autor sich sehr viel vorgenommen hat und dann doch zu kurz gesprungen ist. Ungenauigkeiten und ungeschickte Formulierungen ziehen sich durch das ganze Werk; einige Behauptungen, die mit dem Anspruch auf absolute Gültigkeit vorgetragen werden, sind doch eher Hypothesen, deren Tragfähigkeit sich erst noch erweisen muss. Und was den Autor dazu veranlasst hat, in seiner unsäglichen Anmerkung 59 den Verfechtern der künstlichen Intelligenz den »Vernichtungswahn der Hitlerei« zu unterstellen und bei der Gelegenheit auch Konrad Lorenz – der sich in der Tat zum Nationalsozialismus bekannt hat – in denselben Topf zu werfen, bleibt sein Geheimnis. Der Kontext war es nicht; denn es ging darum, wie winzig klein der Mensch sich gegenüber den riesigen Weiten des Weltraums fühlt.

Man kommt mit diesem Buch nicht, wie im Text auf der Buchrückseite behauptet, »unversehens zu überraschenden, zu verwirrenden Einsichten über die Welt, die, wenn man sie zu Ende zu denken wagt, alle von der gängigen Science Fiction dargebotenen Hypothesen und Szenarien locker überbieten«. Es enthält auch keine Geheimnisse, keine Sensationen, keine im philosophischen Sinn tiefere Bedeutung der Zahlen. Es ist ein hübsches, zum Teil sehr gefälliges, vielgestaltiges Kaleidoskop zu einem reichhaltigen Thema – aber eben nicht mehr. Mit etwas mehr Sorgfalt und Zurückhaltung wäre es vielleicht sogar ein richtig gutes Buch geworden.

Andreas Nestke

Der Rezensent ist promovierter Mathematiker und lehrt Mathematik an Fachhochschulen in Berlin.

UR- UND FRÜHGESCHICHTE

Wolfgang Schürle, Nicholas J. Conard und Stefanie Kölbl (Hg.)

Vom Neandertaler zum modernen Menschen

Thorbecke, Ostfildern 2005. 208 Seiten, € 19,90

Die Zeit zwischen etwa 40 000 und 28 000 Jahren vor heute ist in der Geschichte des Menschen entscheidend: Figürliche Kunst, Musik und Schmuck offenbaren eine neue Geisteshaltung. Die Menschen transportieren Feuerstein über weite Distanzen und zerlegen ihn mit der Klingentechnik. Geweih- und Knochenverarbeitung werden alltäglich. Am Ende sind in Europa die Neandertaler verschwunden, nur die modernen Menschen verbleiben. Die Archäologie lässt mit den Neuerungen eine Epoche beginnen: das Jungpaläolithikum.

Ohne Effekthascherei präsentieren zwölf Fachwissenschaftler die wichtigsten und neuesten archäologischen und anthropologischen Fakten zu dieser Zeit. Fassettenreich spüren sie zum Beispiel den Umweltbedingungen nach, erklären Genanalysen und präsentieren das entscheidende und neueste Fundmaterial.

Dabei wird schnell deutlich, dass der Übergang äußerst komplex war. Kaum ein Wissenschaftler vertritt noch das einfache Modell, wonach allein die anatomisch modernen Menschen Urheber der Innovationen waren. Die Faktenlage hat sich entscheidend gewandelt: Skelette moderner Menschen wurden jünger datiert, sodass eine Einwanderung in das südöstliche Mitteleuropa erst ab 35 000 Jahren vor heute belegt ist. Zu dieser Zeit sind die kulturellen Neuerungen jedoch schon weit gehend ausgeprägt. Auf der anderen Seite sind Neandertalerknochen mit Funden der so genannten Übergangsindustrien verknüpft, die bereits Merkmale des Jungpaläolithikums enthalten.

Im Fokus stehen zwei Fragen:

▶ Wer schuf die Übergangs- und die frühesten jungpaläolithischen Industrien? Hier betonen die Autoren den Anteil des Neandertalers an der Erneuerung. Erst aus der Auseinandersetzung beider Menschenarten miteinander erwuchs kulturelle Modernität.

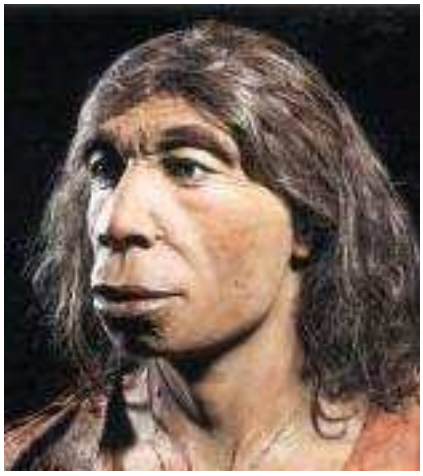
▶ Sind sich die beiden Menschengruppen begegnet, und wie könnte diese Begegnung ausgesehen haben? Möglicherweise, so die Tübinger Dozentin Miriam Noël-Haidle, sind die Neandertaler in den modernen Menschen aufgegangen (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 6/2000, S. 42): »Vielleicht besitzt der eine oder die andere noch einen winzigen Rest von Neandertaler-Erbgut.«

Das Buch, zugleich Begleitband zur Sonderausstellung »Galerie 40tausend Jahre Kunst« in Blaubeuren, ist populärwissenschaftlich ausgerichtet, steht aber auf einer soliden fachwissenschaftlichen Grundlage. Manche Aufsätze gehen sehr stark in die Tiefe. Einige Grundkenntnisse muss der Leser gelegentlich mitbringen. Doch für jeden, der zum 150. Jahrestag der Entdeckung des Neandertalers mit den wichtigsten Fakten der Forschung und den neuesten Modellen vertraut sein möchte, ist dieses Buch das passende Rüstzeug.

Thomas Brock

Der Rezensent studiert Ur- und Frühgeschichte und arbeitet als Journalist und Museumspädagoge in Hamburg.

Im Lauf der Zeit wandelte sich die bildliche Darstellung des Neandertalers von der »primitiven Bestie« zu immer »menschlicherer« Gestalt. Rechts von oben nach unten: 1888, nach dem Fund aus dem Neandertal; 1909, nach dem 1908 gefundenen, besser erhaltenen Skelett des »Alten von La-Chapelle-aux-Saints«; 1950; 1955, nach dem Schädel des »Alten«. Unten links die moderne Rekonstruktion einer Neandertalerin.



PHILOSOPHIE

Mario Bunge und Martin Mahner

Über die Natur der Dinge

Materialismus und Wissenschaft

Hirzel, Stuttgart 2004. 273 Seiten, € 24,–

Um seinen Zeitgenossen die Furcht vor den Göttern und dem Tod zu nehmen, verfasste der römische Dichter und Philosoph Lukrez (97–55 v. Chr.) sein von der materialistischen Atomlehre der griechischen Antike geprägtes Lehrgedicht *De rerum natura* (»Über die Natur der Dinge«) – und wurde so zu einem einflussreichen Popularisierer eines aufgeklärten wissenschaftlichen Weltbildes. Mit dem respektvoll von Lukrez entlehnten Titel erinnern der argentinische Physiker und Philosoph Mario Bunge und der Biologe Martin Mahner an diese alte materialistische Tradition. In erster Linie aber wollen sie einen breiten Leserkreis vom modernen Materialismus überzeugen.

Warum ist ihnen das wichtig? Erstens versuchen sie zu zeigen, dass nur der Materialismus konsistente philosophische Voraussetzungen für die Realwissenschaften schaffen kann, obwohl deren Vertreter sich nicht einmütig zu ihm bekennen und manchmal sogar glauben, ganz ohne Philosophie auskommen zu können. Zweitens wollen sie das emanzipatorische Potenzial des Materialismus konsequent nutzbar machen und so Argumente gegen Pseudowissenschaft, Religion und Esoterik liefern.

Seit der Antike stehen sich mit dem Idealismus und dem Materialismus zwei radikal verschiedene philosophische Weltbilder gegenüber. Dabei geht es grob gesprochen um die Frage, ob ausschließlich das Geistig-Ideelle oder ausschließlich das Materielle real existiert. Als Materialisten vertreten Bunge und Mahner den zweiten Standpunkt; aber auch der Materialismus kennt noch zahlreiche Spielarten. Die Autoren grenzen sich insbesondere vom Physikalismus und vom Dialektischen Materialismus ab: An Ersterem kritisieren sie die reduktionistische These, die Welt könne allein von der Physik her erklärt werden; bei Letzterem nehmen sie Anstoß an einigen der so genannten Gesetze der Dialektik.

Ein Objekt ist nach Bunge und Mahner genau dann materiell – und damit real existent –, wenn es veränderbar ist, das heißt, wenn der Wert mindestens einer Eigenschaft des Objekts sich im Lauf der Zeit ändern kann. Dieses Kriterium ist brauchbarer als andere häufig verwendete Kriterien wie sinnliche Wahrnehmbarkeit, Massehaltigkeit oder raumzeitliche Lokalisierbarkeit. Auf diese Weise können nämlich unter anderem auch elektromagnetische Felder als materiell angesehen werden. Energie gilt nicht als immateriell, da sie als Eigenschaft materieller Objekte interpretiert wird.

Die von Bunge und Mahner vertretene Form des Materialismus heißt »emergentistisch« und ist charakterisiert durch eine starke Betonung des Systemgedankens: Jedes Ding ist ein System oder Bestandteil eines Systems. Und Systeme haben emergente Eigenschaften, das sind solche, die keiner der Bestandteile des Systems besitzt. Als Paradebeispiele gelten die Flüssigkeit von Wasser (einzelne Moleküle sind nicht flüssig) oder die Lebendigkeit einer Zelle (einzelne Moleküle sind nicht lebendig).

Die Existenzweise des Geistig-Ideellen, also abstrakter Objekte wie Zahlen oder mythologischer Personen, ist für Materialisten meist eine harte Nuss. Die Autoren verstehen abstrakte Objekte als Äquivalenzklassen von möglichen Gedanken, das heißt als das, was ähnlichen Gedanken, die in verschiedenen Gehirnen gedacht werden können, gemeinsam ist. Abstrakten Objekten kommt daher bloß der Status der fiktiven Existenz zu, die gleichsam zeitlos ist, da sich in Wirklichkeit immer nur die denkenden Gehirne verändern. Gemäß dieser Auffassung gibt es keine Gedanken ohne denkende Gehirne und somit auch keine Ideen im Sinne Platons, die in einem »idealen Begriffs-Steinbruch« abgebaut werden könnten. In diesem Zusammenhang lehnen die Autoren auch die bei Naturwissenschaftlern und Hobbyphilosophen beliebte Drei-Welten-Lehre von Popper als »Monster traditioneller Metaphysik« ab.

Aber hat nicht die Quantenmechanik die Grundannahmen des Materialismus letztendlich widerlegt? Diese Frage verneinen die Autoren entschieden, ob-

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

Michael Schünke, Erik Schulte, Udo Schumacher

Prometheus. Lernatlas der Anatomie

Hals und Innere Organe

Thieme, Stuttgart 2005, 371 Seiten, € 39,95

Der zweite Band der Reihe zeigt in über 750 plastischen Abbildungen Lage und Aufbau der Körperteile und ihre Beziehungen zu den benachbarten Organen. Die mit Hilfe moderner Computertechnologie hergestellten Abbildungen sind sehr klar und in natürlichen Farben gehalten. Oft sind anatomische Verhältnisse bis ins kleinste Detail wiedergegeben. Da zugleich nur die für das jeweilige Thema wichtigen Strukturen abgebildet sind, besteht nicht die Gefahr, die Übersicht zu verlieren. So werden aus teilweise auch ungewohnten Perspektiven sehr einprägsam wichtige anatomische Fakten erkennbar.

Die guten Abbildungen und die praxisbezogenen Texte machen die Beschäftigung mit Anatomie zum Vergnügen.

Aus der Rezension
von Claudia Borchard-Tuch

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	24

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/rezensionen

wohl aus der Kopenhagener Deutung und der Heisenberg'schen Unschärferelation »viele subjektivistische und indeterministische Philosophen Honig gesaugt haben«. In Wirklichkeit jedoch beschreibe die Quantenmechanik die objektive Realität unabhängig von Messgerät und Beobachter, und der quantenmechanische Determinismus reiche auf Grund seiner stochastischen Komponente zwar über den klassischen Determinismus hinaus, sei aber weit entfernt von einem radikalen Indeterminismus.

Ebenso entschieden wenden sich Bunge und Mahner gegen nichtmaterialistische Lösungen des Gehirn-Geist-Problems. Geist sei eben nicht immateriell, sondern eine emergente Eigenschaft des materiellen Systems Gehirn. Und Dinge könnten – im Gegensatz zur Auffassung des Physikalismus – nicht nur physikalische Eigenschaften haben, sondern auch biotische, soziale oder mentale.

Schließlich begeben sich die Autoren auf das Feld von Ethik und Religion. Dass beide notwendig miteinander verbunden seien, erklären sie zum »populären Irrtum«; darüber hinaus lassen sie an der christlichen Ethik samt Gebotstheorie und Naturrechtslehre kein gutes Haar. Stattdessen betonen sie die Fortschrittlichkeit einer materialistischen Ethik, in der Werte nicht an sich existieren, sondern nur in Bezug auf bestimmte Organismen und abhängig von deren Bedürfnissen und Interessen. Im Übrigen seien das wissenschaftliche und das religiöse Weltbild wegen unauflöslicher Konflikte absolut unvereinbar. Umso verwunderlicher also, dass viele herausragende Wissenschaftler wie zum Beispiel Isaac Newton zutiefst religiös waren und kurioserweise durch ihre Forschung den Plan des Schöpfers enträtseln wollten.

Das alles ist nun im Einzelnen nicht neu. Aber es ist übersichtlich und systematisch zusammengestellt, und die philosophischen Begriffe werden stets präzise und verständlich eingeführt. Die Autoren sezieren ihre Gegner gründlich und können dabei im Großen und Ganzen auch überzeugen. Der Text bleibt allerdings – trotz des Bemühens um einen lockeren Stil mit zahlreichen polemischen Spitzen – streckenweise etwas trocken.

Zudem ist inhaltlich einiges zu kritisieren: Bei der ethischen Diskussion um »Personenrechte statt Menschenrechte« bleibt die klare Distanzierung von radikalen Bioethikern wie Peter Singer aus; irritierend ist auch die Einteilung ethischer Probleme in mini-ethische (zum Beispiel Abtreibung und Euthanasie) und mega-ethische (zum Beispiel Armut und Überbevölkerung), wobei angeblich nur letztere einer ergänzenden politischen Philosophie bedürfen. Ebenso verspürt man Unbehagen bei dem recht traditionellen Wissenschaftsverständnis von Bunge und Mahner, die mindestens unterschwellig den Mythos der Objektivität und Rationalität von Wissenschaft permanent verteidigen. Dabei würde auch der Wissenschaft ein weniger idealisiertes Bild letztlich eher nutzen als schaden.

Oliver Walkenhorst

Der Rezensent hat Physik studiert und arbeitet am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

THEORETISCHE PHYSIK

Stephen Webb

Out of this World

Colliding Universes, Branes, Strings, and Other Wild Ideas of Modern Physics

Copernicus, New York 2004. 308 Seiten, € 32,05 (Springer) , € 25,90 (Amazon)

Die avanciertesten Theorien der gegenwärtigen Physik stecken voll »wilder Ideen«. Elfdimensionale Räume, Superstrings und Paralleluniversen kommen nicht nur dem Laien verwegen vor. Auch naturwissenschaftlich gebildete Leser, die sich an exotische Begriffe wie Raumkrümmung, Zeitdilatation oder Quantenverschränkung gewöhnt haben, werden viele der Ideen, die Stephen Webb ausbreitet – Gedankengebilde weit jenseits des empirisch Zugänglichen –, für reichlich gewagt halten.

Der Autor arbeitet an der Open University, einer britischen Fernuniversität; er berichtet ohne mathematische Formeln, nur mit umgangssprachlichen Mitteln, von hochabstrakten Konzepten, die derzeit in einer kleinen, aber weltweiten Gemeinde von Theoretikern zirkulieren. Das ergibt kein Lehrbuch, sondern eine Ideenreportage, die veranschaulicht, wie ungeheuer schwer es geworden ist – für Laien wie Experten –, sich hundert Jahre nach Einstein in der Welt der theoretischen Physik zurechtzufinden.

Denn auch auf die heutige Grundlagenphysik passt Goethes weniger bekanntes Götz-Zitat »Wo viel Licht ist, ist starker Schatten«. Zwischen den strahlenden Gebäuden von Quantenphysik und Relativitätstheorie gähnt ein finsterer Abgrund; die beiden wollen einfach nicht zusammengehen. Von Schwindel erregenden Brückenschlägen handelt das Buch. Bei manchem Ansatz wird erst die Zukunft zeigen, ob er, wie der doppeldeutige Buchtitel besagt, noch von dieser Welt ist oder auf Nimmerwiedersehen aus ihr hinausführt.

An einem inzwischen alltäglichen Instrument wie dem Global Positioning System (GPS), mit dem sich Autofahrer und Bergsteiger orientieren, illustriert Webb das Wohl und Wehe moderner Theorie: GPS-Geräte funktionieren blendend – einerseits auf Grund der Quantenphysik, andererseits, weil sie die allgemein-relativistische Zeitdilatation, verursacht durch winzige Gravitationsunterschiede zwischen Erdboden und Satellitenbahnen, berücksichtigen. Doch hinter dem Triumph der Technik verbirgt sich ein Makel der Theorie: Schon Einstein scheiterte an einer Allgemeinen Feldtheorie, Heisenberg an einer Weltformel, und bis heute gibt es keine The- ▷

Zu einem Soliton – einem hypothetischen magnetischen Monopol – gibt es ein formal äquivalentes, biederes Gegenstück: eine einzelne, stabile Wasserwelle, wie sie 1995 in einem schottischen Kanal nach einem historischen Vorbild von 1834 erzeugt wurde.

▷ orie von Allem, die Quanten und Schwerkraft unter dem Dach einer künftigen Quantengravitation vereinigt.

Für irdisch-praktische Zwecke lässt sich damit ganz gut leben, siehe GPS, aber Grundlagenforscher und insbesondere Kosmologen wollen auf das große Ganze hinaus. Die Vorgänge unmittelbar nach dem Urknall waren pure Quantengravitation und entschieden über die kosmische Gesamtstruktur. Heraus kam ein Universum, das zu 25 Prozent aus Dunkler Materie und zu 70 Prozent aus Dunkler Energie besteht. Wir kennen physikalisch kaum 5 Prozent der Welt, in der wir leben. Viel Platz also für Spekulationen.

Viele der »wilden Ideen«, die Webb beschreibt, haben Leser dieser Zeitschrift bereits kennen gelernt: duale Strings und Branen, das holografische Prinzip und das ekpyrotische Szenario, das anthropische Prinzip und hypothetische Gravitonen, die in höheren Dimensionen versickern. Doch ein Buch bietet mehr Raum als ein Artikel – und damit die Chance, in die Breite zu gehen, Zusammenhänge herzustellen und eine kleine Wissenschaftsgeschichte für Zeitgenossen zu verfassen. Diese Chance hat der Autor gut genutzt.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

SCIENCEFICTION

Michael Hanlon

The Science of The Hitchhiker's Guide to the Galaxy

Macmillan, London 2005. 208 Seiten, £ 16,99 / $ 24,95

DEUTSCHE AUSGABE:

Per Anhalter durch die Galaxis – im Licht der Wissenschaft

Aus dem Englischen von Hainer Kober. Rowohlt, Reinbek 2005. 256 Seiten, € 8,90

Ob Star-Trek-Universum, Tolkiens Mittelerde, Terry Pratchetts Scheibenwelt oder Harry Potters Zauberschule Hogwarts: Zu all diesen Fantasiewelten gibt es mittlerweile Bücher, welche die Bezüge zur realen Wissenschaft beleuchten. Nun ist die skurrile Welt von Douglas Adams' (1952–2001) Bestseller »Per Anhalter durch die Galaxis« an der Reihe. Die »fünfbändige Anhalter-Trilogie in vier Bänden« erzählt die galaktischen Abenteuer des Erdlings Arthur Dent, der unerwartet vor der Zerstörung der Erde gerettet wird. Die lang erwartete Hollywood-Verfilmung ist im vergangenen Juni in die deutschen Kinos gekommen.

Der britische Wissenschaftsjournalist Michael Hanlon nimmt die Anhalter-Trilogie (vor allem die ersten beiden Bände) zum Anlass für populärwissenschaftliche Plaudereien über Außerirdische, die Existenz Gottes, Zeitreisen, Parallelwelten, Ursprung und Ende des Universums, Computer und so weiter. Das liest sich ganz nett, ist aber oft nicht mehr als eine launige Nacherzählung anderer populärwissenschaftlicher Bücher – die im Anhang auch noch zur »Weiterführenden Lektüre« empfohlen werden –, spärlich garniert mit einigen Zitaten aus und Anspielungen auf »Per Anhalter durch die Galaxis«. Doch dieses Werk, eine urkomische Mischung aus Sciencefiction, »Monty Python's Flying Circus« und »Gullivers Reisen«, spiegelt noch am wenigsten die naturwissenschaftlichen Interessen wider, die Adams ab Ende der 1980er Jahre zunehmend entwickelte und in sein Werk einfließen ließ. Darüber verliert Hanlon kein Wort und verschenkt damit eine Unmenge interessanter (und relevanterer!) Bezüge. Dass er etwa im Kapitel über »Zeitreisen« Adams' Roman »Der elektrische Mönch« (»Dirk Gently's Holistic Detective Agency«) links liegen lässt, in dem der zeitreisende Professor Chronotis für temporale Verwirrungen sorgt, und sich stattdessen auf den Film »Zurück in die Zukunft« bezieht, ist geradezu ärgerlich.

Hanlons – gänzlich unbebildertes – Buch hätte nur einen kurzen Eintrag im galaktischen Reiseführer verdient: größtenteils belanglos.

Alexander Pawlak

Der Rezensent ist Diplomphysiker und arbeitet als Redakteur beim »Physik Journal« in Weinheim.

KLIMAFORSCHUNG

Helga Kromp-Kolb, Herbert Formayer

Schwarzbuch Klimawandel

Wie viel Zeit bleibt uns noch?

Ecowin Verlag der TopAkademie GmbH, Salzburg 2005. 224 Seiten, € 19,90

Eigentlich ist ein Schwarzbuch ein Mittel, finstere Menschen, Ideologien oder Organisationen an den Pranger zu stellen: Kommunismus, Markenfirmen, Banken, den KGB, den Dschihad und natürlich Franz Josef Strauß seligen Angedenkens. Das vorliegende Buch ist auch wirklich pechschwarz, mit dramatisch feuerrot brodelnder Sonnenoberfläche – aber nur von außen. Das Innere des Buchs straft den Umschlag Lügen.

Helga Kromp-Kolb und Herbert Formayer, Meteorologen an der Wiener Universität für Bodenkultur, haben über das politisierte Thema Klimawandel ein hochaktuelles Buch geschrieben, das weit gehend frei von Alarmismus ist. In siebzehn handlichen Kapiteln erläutern sie die wissenschaftlichen Grundlagen, schildern die globalen und regionalen Szenarien des Klimawandels und präsentieren ihre Sicht der Debatte. Sie nennen die Unsicherheiten in der Klimaforschung beim Namen, relativieren aber nicht die dringlichen Warnungen ihrer Forscherzunft: Bis zum Jahr 2100 wird die mittlere Lufttemperatur nahe der Erdoberfläche um 1,4 bis 5,8 Grad steigen – so referieren sie den letzten Sachstandsbericht des International Panel on Climate Change von 2001. Mehr

als die Hälfte der Spannbreite in der Prognose ist von der Ungewissheit darüber verursacht, wie sich der Ausstoß der Treibhausgase entwickeln wird. Weil die Kohlendioxidemissionen unter anderem von der Menge des noch förderbaren Erdöls abhängen, ist dem Schwarzen Gold ein erhellendes Extrakapitel gewidmet.

Teils eindrucksvolle Fotos dienen zur Auflockerung, und instruktive Abbildungen helfen bei der Erläuterung der behandelten Themen. Die Autoren geben zu allen Infografiken die Quellen an und belegen ihre Thesen durch Literaturhinweise. Das ist guter Standard. Was das Buch von vergleichbaren Werken auf dem Markt abhebt, ist vor allem die intensive Auseinandersetzung damit, wie der Klimawandel in der breiten Öffentlichkeit diskutiert wird.

Ganz speziell widmen sich Kromp-Kolb und Formayer der »Rolle von Wissenschaft und Medien«. Bei allem Verständnis für den unstillbaren Bedarf des Journalismus nach Schlagzeilen weisen sie beharrlich darauf hin, wie sehr Zuspitzungen – Katastrophismus oder Abwiegelung – der öffentlichen Auseinandersetzung über das ernste Thema schaden: Den heftigen Klimastreit, wie ihn manche Medien notorisch fingieren, gibt es so nicht. In einem Kapitel über die Zweifler am menschengemachten Klimawandel lassen die Autoren kaum ein gutes Haar an deren Argumenten. Dennoch: »Letzte Sicherheit kann die Wissenschaft nicht bieten.«

Gänzlich vermeiden lässt sich der anthropogene Klimawandel nicht mehr. Doch Kromp-Kolb und Formayer malen keine Apokalypse an die Wand: Wenn es gelingt, die Treibhausgasemissionen deutlich zu senken, könnte der Temperaturanstieg auf weitere 2 Grad beschränkt werden. Diese willkürlich gezogene Grenze sei eine »wissenschaftlich gestützte Bewertung dessen, was als tolerabel gelten kann«. Dennoch empfehlen die Autoren, Maßnahmen zur Anpassung an den Wandel zu treffen: Diese sollten möglichst »die Flexibilität des Systems erhöhen«, denn man weiß eben noch nicht so genau, was auf die Menschheit zukommt. Übersetzt für die Alpenländer bedeutet das: Die Tourismusindustrie sollte im Winter besser nicht allein auf Skigebiete setzen.

Bedauerlich an dem Werk ist nur, dass die vielen Aspekte des Themas in ▷

PREISRÄTSEL

Gleichungen kreuz und quer

Von Roland Mildner

In die Leerfelder der beiden unten abgebildeten Quadrate sollen jeweils alle natürlichen Zahlen von 1 bis 16 so eingetragen werden, dass sich in allen Zeilen und Spalten korrekte Gleichungen ergeben.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Armbanduhren »Spektrum«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 14. 2. 2005, eingehen.

	+		−		=	
+	■	−	■	+	■	−
	+		−		=	
−	■	+	■	−	■	+
	+		−		=	
=	■	=	■	=	■	=
	+		−		=	

	−		+		=	
·	■	■	■	■	■	−
	·		−		=	
−	■	■	■	■	■	−
	:		+		=	
=	■	■	■	■	■	=
	+		−		=	

Lösung zu »Faktorenanalyse« (Dezember 2005)

Es gibt acht mögliche Lösungen:

- $1 \cdot 11 \cdot 303 = 3333$
- $1 \cdot 33 \cdot 101 = 3333$
- $3 \cdot 11 \cdot 101 = 3333$
- $1 \cdot 41 \cdot 813 = 33333$
- $3 \cdot 41 \cdot 271 = 33333$
- $7 \cdot 99 \cdot 481 = 333333$
- $9 \cdot 77 \cdot 481 = 333333$
- $9 \cdot 91 \cdot 407 = 333333$

Das Produkt der drei Faktoren *a*, *b* und *c* muss zwischen $1 \cdot 10 \cdot 100 = 1000$ und $9 \cdot 99 \cdot 999 = 890\,109$ liegen. Damit kommen als Produkte nur 3333, 33333 und 333333 in Frage. Zerlegen wir die drei Kandidaten in Primfaktoren:

- $3333 = 3 \cdot 11 \cdot 101$
- $33333 = 3 \cdot 41 \cdot 271$
- $333333 = 3 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 27$

Aus dem jeweiligen Sortiment der Primteiler sind nun die geforderten Faktoren *a*, *b* und *c* zusammenzusetzen. Zusätzlich kann allerdings die Eins als der einstellige Teiler auftreten.

Während die Situation bei den Produkten 3333 und 33333 fast auf den ersten Blick zu erkennen ist, muss man bei 333333 noch ein bisschen nachdenken: Wäre die Drei der einstellige Teiler, so müsste sich die Zahl $333333 : 3 = 111111$ als Produkt einer zwei- und einer dreistelligen Zahl ergeben. Das ist aber nicht möglich, denn selbst $999 \cdot 99$ ist nur 98901. Aus demselben Grund kann die Eins erst recht nicht der einstellige Teiler sein. Damit bleiben für diese Rolle nur noch 7 und 9 übrig. Die übrigen Faktoren findet man durch Ausprobieren.

Die Gewinner der fünf Taschenmesser »Rally« sind Christina Junger, Bopfingen; Rainer Hoffmann, Saarbrücken; Elisabeth Arnold, Essenbach; Eich Eisfeld, Wetzlar; und Jürgen Baumann, Köln.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

men und durch Signalsysteme im Freien verbessert werden, doch die sind teuer. Ein weiteres Problem: Die Übermittlung nichttextlicher Information – vor allem Bilder, Audio und Video – erfordert höhere Übertragungsbandbreiten, als PDAs verarbeiten und deren Netzwerke bereitstellen können. Das Protokoll für lokale drahtlose Netzwerke, IEEE 802.11b, weist eine Bandbreite von bis zu 11 Megabit pro Sekunde auf. Tests zeigten, dass dies ausreicht, um ortsbezogene Suchdienste zur Verfügung zu stellen. Allerdings ist das Protokoll noch nicht sehr verbreitet.

Die persönlichen Interessen des Nutzers und seine gegenwärtige Position sind aber nicht alles. Suchmaschinen beantworten neuerdings nicht nur Textanfragen, sondern liefern auch grafisches Material. Im Internet stehen bereits viele dreidimensionale Bilder zur Verfügung. Doch Künstler, Illustratoren und Designer können diese Informationen nicht effektiv mittels Schlüsselwörtern auffinden. Die Suchmaschine »3-D Model Search Engine« von der Arbeitsgruppe zur Formsuche und Formanalyse der Princeton-Universität (New Jersey) kann auf dreierlei Weise nach solcher Information suchen (siehe Grafik links).

Wie finde ich ein Lied?

Bei der ersten Methode verwendet der Anwender ein Grafikpad namens Teddy, mit dem er einfache zweidimensionale Formen darstellen kann. Die Software erzeugt daraus dann virtuelle Suchmuster, indem sie die 2-D-Bilder durch den Raum zieht. Bei der zweiten Methode zeichnet der Anwender zweidimensionale Formen (wie unterschiedliche Projektionen eines Bilds), und die Suchmaschine vergleicht diese »flachen« Vorlagen mit 13 vorgespeicherten Projektionen, die sie von jedem 3-D-Objekt in ihrer Datenbank hat. Theoretisch ließe sich dies so ausweiten, dass die Suche mit allen Arten von zweidimensionalen Bildvorlagen möglich wird. Die dritte Methode schließlich besteht darin, ein Dokument hochzuladen, das ein 3-D-Modell enthält.

Das noch in der Entwicklung befindliche System ordnet Anfragen Formen zu, indem es zunächst eine jede als Serie mathematischer Funktionen beschreibt. Für dreidimensionale Bilder verwendet es harmonische Funktionen, für zweidimensionale Bilder trigonometrische. Anschließend erzeugt das System von jeder Funktion so genannte »kugelförmige« oder »kreisförmige« Signaturen, die als Fingerabdruckwerte oder kurz Fingerabdrücke bezeichnet werden. Die Verwendung dieser Deskriptoren bringt zwei Vorteile: Zum einen können sie von Computern schnell verarbeitet und verglichen werden; zum anderen funktioniert die Suche unabhängig davon, wie das Original und die Suchvorlage zueinander orientiert sind.

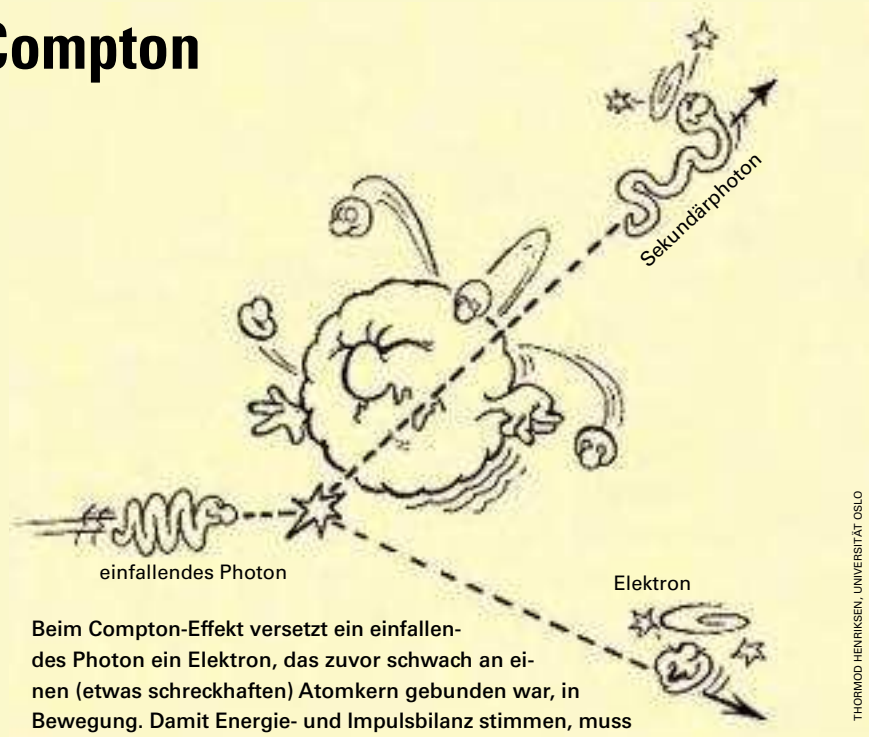
Auch Musik hat in der Welt der Suchmaschinen Einzug gehalten. Das größte Problem bei der Suche nach einem Musikstück besteht darin, wie man die Suchanfrage am besten formuliert. Eine Möglichkeit besteht in der Eingabe von Musiknoten – oder einer auf Transkriptionen basierenden Suchsprache, die es dem Nutzer erlaubt, eine Melodie durch Eingabe alphanumerischer Zeichen zu beschreiben. Den meisten Anwendern bereitet es jedoch Schwierigkeiten, ein Stück, das sie im Kopf haben, in Notenform darzustellen. ▷

Geometrie mit Compton

Ein energiereiches Photon trifft ein Elektron und versetzt es in Bewegung; ein energieärmeres Photon fliegt in einer anderen Richtung davon. Dies lässt sich geometrisch mit abstrakten Eisbechern und -waffeln veranschaulichen.

Von Norbert Treitz

Dem Andenken von Prof. Horst Harreis (1940–2002) gewidmet



THORMOD HENRIKSEN, UNIVERSITÄT OSLO

Beim Compton-Effekt versetzt ein einfallendes Photon ein Elektron, das zuvor schwach an einen (etwas schreckhaften) Atomkern gebunden war, in Bewegung. Damit Energie- und Impulsbilanz stimmen, muss ein (deutlich schlapperes) Sekundärphoton ausgesandt werden.

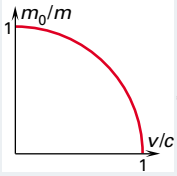
Physiker haben eine besondere Vorliebe für Stoßprozesse, und zwar für die ganz einfachen, bei denen die Stoßpartner nicht über ein nennenswertes Innenleben verfügen. Dann nämlich kann die Energie sich nicht in undurchsichtiger Weise, etwa als Deformation oder geringe Temperaturerhöhung, aus dem Blickfeld des Betrachters schleichen, sondern muss so gehen, wie sie gekommen ist: als Bewegung. Allenfalls in einem Potenzialfeld, etwa einem Schwere- oder elektrostatischen Feld, kann sich noch Energie verstecken. Klassische Beispiele sind die idealisierten Billardkugeln oder auch Planeten (auf deren eigentlich vorhandenes Innenleben es in diesem Fall nicht ankommt).

Unter dieser Voraussetzung kommt man schon ziemlich weit, wenn man pro Stoßpartner nur zwei Größen kennt: Impuls und Energie. Die (Vektor-)Summe aller Impulse bleibt bei dem Stoß erhalten, ebenso die Gesamtenergie, und zu allem Überfluss hängen Impulsbetrag p und kinetische Energie E_{kin} jedes Beteiligten auf einfache Weise miteinander zusammen: In der Schule lernt man $E_{kin} = mv^2/2$ (m ist die Masse und v die Geschwindigkeit); mit dem Impuls $p = mv$ ausgedrückt lautet diese Formel $E_{kin} = p^2/(2m)$. Sie gilt zwar nur im klassischen Grenzfall langsamer Bewegungen; aber ihre relativistische Genossin ist auch nicht wesentlich komplizierter (siehe Kasten unten).

Trägt man die Energie in dieser Näherung gegen den Impuls auf, so ergibt sich also eine Parabel. Eigentlich ist der Impuls ein Vektor mit drei Komponenten. Von ihnen brauchen wir im Folgenden nur zwei und denken uns diese waagerecht auf dem Tisch. Dann haben wir den Platz, rechtwinklig zu ihnen senkrecht nach oben die Energie aufzutragen.

Impuls und Energie bei relativistischen Geschwindigkeiten

Nach der Relativitätstheorie wächst die Masse m eines bewegten Körpers mit seiner Geschwindigkeit nach der Formel $m = m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$ an. Dabei ist m_0 die »Ruhemasse« des Körpers, das heißt die Masse, die er in dem Bezugssystem hat, das sich mit ihm mitbewegt. Nach der Formel $E = mc^2$ gilt demnach für seine Energie $E = m_0c^2/\sqrt{1-v^2/c^2}$; man quadriere diese Gleichung, setze die »Ruheenergie« $E_0 = m_0c^2$ ein und erhalte nach einigen Umformungen $E^2 - E_0^2 = (pc)^2$, wobei nach wie vor $p = mv$ gilt. Mit den Größen m und v ausgedrückt nimmt diese Gleichung die Form $(m_0/m)^2 + (v/c)^2 = 1$ an: Der Zusammenhang zwischen (dynamischer) Masse und Geschwindigkeit ist eine Kreisgleichung (siehe Bild)!



CHRISTOPH PÖPPE / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Für kleine Geschwindigkeiten darf man in der Gleichung $E^2 - E_0^2 = (E - E_0)(E + E_0) = (pc)^2$ den zweiten Faktor durch $2E$ approximieren und erhält, abermals Einsteins Gleichung einsetzend, die klassische Formel $E_{kin} = E - E_0 = p^2/(2m)$ zurück.

Aus der Parabel wird in dieser Darstellung ein Rotationsparaboloid; diese Fläche kann man sich so vorstellen wie die Innenseite eines – unendlich hohen – Eierbechers. Über die geometrische Interpretation dieser und ähnlicher Beziehungen gelangt man überraschend einfach zu Aussagen über das Verhalten der Stoßpartner; das habe ich Ihnen in früheren Folgen dieser Rubrik vorgeführt (Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 101, und 3/2005, S. 114).

In diesem Monat sind die Helden unserer Geschichte Stoßpartner, deren Innenleben nicht nur vernachlässigbar, sondern schlicht nicht vorhanden ist. Die Hauptperson ist ein Elektron; man kann aber auch andere Teilchen verwenden, die allein keine angeregten Zustände haben können, zum Beispiel frei laufende Protonen. Die anderen Mitspieler sind Photonen, und das ganze Spiel heißt »Compton-Effekt«.

Die gebräuchliche Redeweise ist, ein ankommendes Photon werde »am Elektron gestreut«, werde dabei kleiner (längerwellig) und laufe in einer anderen Richtung weiter. Tatsächlich hat das davonlaufende Photon mit dem einfallenden nichts gemein, außer zur gleichen Zeit am gleichen Ort gewesen zu sein. Denn die beiden unterscheiden sich in dem einzigen Merkmal, an dem Photonen überhaupt unterscheidbar sind: in der Energie (oder dem Impulsbetrag, was für diese Teilchen im Wesentlichen dasselbe ist).

Ganz wenig Relativitätstheorie

Beim Compton-Effekt wird das Elektron als nahezu ruhend und ungebunden angesehen, also sozusagen frei herumliegend. Genauer gesagt: Es kann mit einigen eV an ein Atom gebunden sein, aber hier wird mit Hunderten von keV geschossen. (Die Bezeichnung eV wie Elektronenvolt bezeichnet die Energie, die ein Elektron oder irgendein Teilchen mit Elementarladung bekommt, wenn es ein elektrisches Potenzial von einem Volt herunterrutscht.) Wir reden also nicht über die milden Photonen, die nur ein Atom in einen angeregten Zustand versetzen – das Gesamtsystem Atom wohlgemerkt und nicht etwa das Elektron. Das hüpft (im klassischen Bild) in eine höhere Umlaufbahn und wird dabei sogar langsamer; dieser Verlust an kinetischer Energie mitsamt der Energie des Photons wird in das elektrische Feld gesteckt.

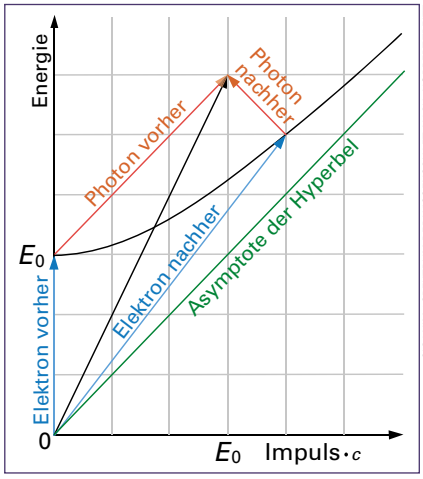
Photonen laufen in jedem Inertialsystem mit der Lichtgeschwindigkeit c. Da hilft schon mangels Ruhemasse die klassische Formel nicht. Aber einen Impuls hat das Photon, und es gilt $E = pc$. Für die Elektronen dagegen wird der Zusammenhang zwischen Energie und Impuls durch die Gleichung $E^2 = E_0^2 + (pc)^2$ ausgedrückt. Dabei ist E_0 die Ruheenergie, die das Elektron schon in Ruhe vermöge seiner Masse hat (Kasten links unten).

Auch diese Beziehung ist wie ihr oben erwähnter klassischer Grenzfall eine Polynomgleichung zweiten Grades in den Variablen E und p, das heißt eine Summe von Termen, die jeweils eine Konstante mal der höchstens zweiten Potenz der Variablen sind. Genau diese Klasse von Gleichungen ist es, die geometrisch einen Kegelschnitt beschreibt. Gesteht man, wie oben, dem Impuls wieder zwei Komponenten zu, so wird aus dem Kegelschnitt eine Fläche zweiter Ordnung im Raum.

Für das Elektron handelt es sich um die obere Schale eines zweischaligen Rotationshyperboloids, deren tiefster Punkt um E_0 über dem Nullpunkt liegt. Seine Asymptotenfläche ist ein Kegel mit der Spitze im Nullpunkt, dessen Mantellinien die Steigung 1 haben. »Weit draußen« schmiegt sich also das Hyperboloid immer enger an den Kegel an, in der Nähe des Nullpunkts ist es dagegen im Vergleich zum spitzen Kegel abgestumpft und schön gerundet. Die flachen Metallbecher, in denen die Eisdiele die großen Portionen zu servieren pflegt, sind eine gute Näherung an eine solche Hyperboloidschale, während der Kegel wesentlich weiter geöffnet ist als eine gewöhnliche Eiswaffel. Das Elektron kann als Bewegungszustand in einem Laborsystem jeden Punkt der Hyperboloidschale annehmen, ein Photon einen beliebigen Punkt des Asymptotenkegels.

Ein Elektron und ein Photon zusammen entsprechen in dem Energie-Impuls-Raum einem Punkt auf einem Photonenkegel, der mit der Spitze auf einem Punkt des Elektronenhyperboloids aufsitzt. Dieser Punkt kann auf keinen Fall wieder auf dem Hyperboloid liegen, denn dessen Steigung ist überall – wenigstens ein bisschen – geringer als die des Kegels. Also kann ein Elektron ein Photon nicht einfach verschlucken.

Ein Atom hat es hier einfacher: Es steckt den gesamten Impuls des Pho- ▷



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ

Ein Elektron mit der Ruheenergie 511 keV (entsprechend 3 Kästchen im Diagramm) wird von einem Photon gleicher Energie getroffen. Bereits die geometrische Darstellung zeigt, dass ein in entgegengesetzter Richtung ausgesandtes Photon genau minus ein Drittel des ursprünglichen Impulses mitnimmt.

Thema: Mathematik

Journalistenpreis der Deutschen Mathematiker-Vereinigung

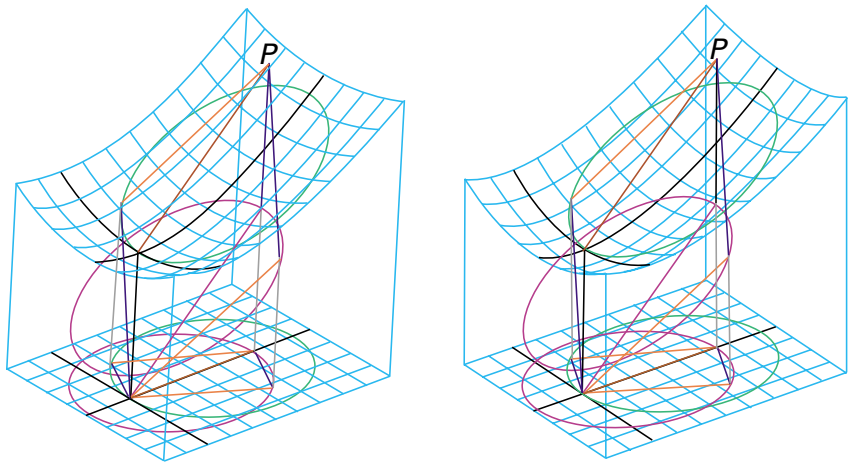
Die Deutsche Mathematiker-Vereinigung (DMV) vergibt 2006 zum zweiten Mal ihren mit 1000 Euro dotierten Journalistenpreis für ein journalistisches Einzelwerk, das in besonderer Weise das Ansehen der Mathematik in der Öffentlichkeit fördert.

Ausgezeichnet werden können im deutschen Sprachraum erschienene Beiträge, unabhängig von ihrem Erscheinungsmedium (Fernsehen, Rundfunk, Print etc.), sofern dieses eine angemessene Verbreitung hat; Erscheinungszeitraum: 1.8.2004 – 31.7.2006.

Auswahljury: Christoph Pöppe, Gero von Randow, Rainer Schulze-Pillot, Günter M. Ziegler

Bewerbungen sind bis zum 31.7. 2006 zu richten an den Präsidenten der DMV,

Prof. Günter M. Ziegler
Institut für Mathematik, MA 6–12
Technische Universität Berlin
D–10623 Berlin
ziegler@math.tu-berlin.de



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ

Die Schnittkurve von Kegel und Hyperboloid und deren Projektion auf die Impulsebene (grüne Ellipsen) im Stereobildpaar: Betrachten Sie das linke Bild nur mit dem linken, das rechte nur mit dem rechten Auge, bis ein räumliches Gesamtbild entsteht. Die Punkte der Schnittkurve entsprechen Energie und Impuls von Elektron und Photon zusammen nach dem Stoß; die violette Ellipse gibt dieselben Größen für das Sekundärphoton allein wieder.

▷ tons in seine eigene Bewegung und springt mit der dann noch überschüssigen Energie in einen angeregten Zustand – falls der Energieüberschuss die passende Größe hat. Da das Elektron diese Möglichkeit nicht hat, muss es ein sekundäres Photon ausgeben, im einfachsten Fall eines, das dem angekommenen zum Verwechseln gleich ist, so als ob gar kein Stoß stattgefunden hätte. Aber es darf auch ein kleineres Photon sein. Die Bilanzen der Energie und der Impulse sagen uns, was dabei möglich ist.

Betrachten wir zunächst einen in doppelter Hinsicht sehr einfachen Spezialfall: Das Photon soll die gleiche Energie haben wie das ruhende Elektron, also 511 keV. Außerdem wünschen wir uns, dass das neue Photon genau nach hinten wegläuft: exakte Rückstreuung. Oder bleibt es einfach stehen wie ein Billardball, der auf einen ruhenden der gleichen Masse prallt? Das ist dem Photon nicht erlaubt, und ohne ein weglaufendes Photon kann die Sache auch nicht ausgehen.

Man kann ausrechnen (oder aus dem dem Bild S. 107 ablesen), was in diesem sehr speziellen Fall passiert: Das Photon gibt 2/3 seiner Energie und 4/3 seines Impulses an das Elektron. Dieses hat nachher 5/3 seiner bisherigen, also seiner Ruheenergie, und außerdem die 4/3 vom Impuls des primären Photons. Für das sekundäre Photon bleiben somit 1/3 der Energie und –1/3 des Impulses vom primären, es läuft also wirklich nach hinten. Passen nun die entsprechenden Werte für das Elektron zusammen? Ja, denn $(3/3)^2 + (4/3)^2 = (5/3)^2$. Die exakte Compton-Rückstreuung realisiert – bis auf den gemeinsamen Nenner 3^2 – das kleinste aller pythagoräischen Tripel.

Zum Vergleich: Ein kleines Objekt (Ball oder Molekül), das gegen eine schwere ruhende Wand oder sonst ein fast unendlich schweres Objekt elastisch prallt, gibt keine Energie, aber das Doppelte seines Impulses ab. Ein Billardball, der elastisch und genau zentral auf einen gleich schweren trifft, gibt genau seinen Impuls und seine Bewegungsenergie an diesen ab. In anderen Inertialsystemen gilt das für den Impulsübertrag unverändert, nicht aber für Vorzeichen und Betrag des Energieübertrags.

Leider gehen nicht alle Rechnungen so einfach im Kopf auf, aber unsere gewölbten Flächen (Hyperboloid und Kegel) machen sie visuell sehr ansprechend.

Ein einfacher Schnitt

Da unser Elektron vor der Begegnung mit dem Photon ruht, liegt es im Energie-Impuls-Raum auf dem tiefsten Punkt seines Hyperboloid-Eisbechers. Dort sitzt der Photonenkegel auf; ein Punkt auf diesem Kegel entspricht also dem Energie-Impuls-Vektor von Elektron und Photon zusammen. Nennen wir diesen Punkt *P*.

Nach der Begegnung muss aber wieder ein Elektron übrig bleiben, das heißt, man muss von diesem erhöhten Punkt wieder auf das Elektronenhyperboloid herunterkommen, und zwar mit dem Vektor eines davonlaufenden Photons. Das bedeutet geometrisch: Wir setzen in den Punkt *P* einen Kopf stehenden Photonenkegel. Überall dort, wo dieser das Elektronenhyperboloid schneidet, ist ein zulässiger Zustand des Elektrons danach. Das davonlaufende Photon entspricht dem Vektor, der von diesem Schnittpunkt nach *P* weist.

Die Menge aller zulässigen Zustände ist also die Schnittkurve eines Hyperboloids mit einem Kegel, ein »Kegelschnitt« sozusagen, aber ist sie auch ein Kegelschnitt im üblichen Sinn, das heißt eine Schnittlinie aus einem Kegel und einer Ebene? Die Antwort ist ja. Wie sieht man das?

Man setzt die beiden Gleichungen für Kegel und Hyperboloid ineinander ein. Dabei fallen alle quadratischen Terme heraus, und man erhält die Gleichung einer Ebene. In dieser Ebene muss unsere Kurve liegen, also ist sie tatsächlich ein Kegelschnitt, und da sie geschlossen ist, muss sie eine Ellipse sein. Sie enthält auch den tiefsten Punkt des Hyperboloids. Der entspricht dem Fall, dass das Elektron ein Photon aussendet, das dem einfallenden zum Verwechseln gleicht und sich selbst nicht von der Stelle rührt.

Die Projektion der Ellipse in die Impulsebene ist abermals eine Ellipse. Auf ihr liegen die möglichen Impulse des Elektrons nach dem Stoß (siehe Bild links oben). ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Brücke zur Physik. Von Norbert Treitz. 3. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 2003

Vorschläge zur Einführung der graphischen Methode z. B. zum Compton-Effekt im Physikunterricht. Von Horst Harreis und Norbert Treitz in: Praxis der Naturwissenschaften – Physik, Bd. 46, Nr. 2, S. 22, 1997

Eine Kopiervorlage für eine geometrische Veranschaulichung von Kegel und Hyperboloid ist über www.spektrum.de abrufbar.

Wille und Wissen

Unser Wille ist frei, weil wir nicht alles wissen können.

Die Willensfreiheit besteht darin, dass zukünftige Handlungen jetzt nicht gewusst werden können

Ludwig Wittgenstein, Tractatus logico-philosophicus, 5.1362

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Ludwig Wittgenstein

Von Michael Springer

Wollte ich das? Eigentlich war ich gerade dabei, durch die neueste Ausgabe von »Nature« zu blättern, als etwas mich veranlasste, ein leeres Word-Dokument zu öffnen und mit »Wollte ich das?« diesen Text zu beginnen. Jetzt könnte ich freilich gleich wieder aufhören und weiter blättern, aber aus freien Stücken schreibe ich weiter – solange ich eben will.

Aber was heißt das? Wenn ich Mitmenschen beobachte oder mich selbst als einen Menschen unter anderen, nehme ich den Standpunkt der dritten Person ein. Ich beschreibe mich von außen, sage »Er« statt »Ich« und stelle fest: Er, also diese Person da, wurde soeben durch gewisse Einflüsse veranlasst, einen Text über Willensfreiheit zu beginnen. In der Welt geschieht nichts ohne Grund und Menschen sind Teil der Welt. Wenn jemand etwas tut, dann steckt dahinter ein dichtes Geflecht von Ursachen. Davon bleibt nichts und niemand ausgenommen. Wenn ich alles über diese Person da wüsste, könnte ich sagen, warum sie jetzt schreibt. Es musste so kommen.

Aber vom Standpunkt der ersten Person erlebe ich etwas völlig anderes. Ich hatte die Möglichkeit, zu lesen statt zu schreiben. Ich spürte keinen unüberwindlichen Zwang zum Schreiben, sondern wählte es aus freien Stücken. Ich wollte es so.

Ich spürte keinen unüberwindlichen Zwang zum Schreiben, sondern wählte es aus freien Stücken. Ich wollte es so

Diese Beschreibungsdiskrepanz zwischen erster und dritter Person macht das Problem der Willensfreiheit aus. Dafür gibt es im Prinzip drei Lösungen:

1. Ich gebe der »ersten Person« Recht: Mein Wille ist frei, ich kann den Weltlauf nach Belieben verändern.
2. Die »dritte Person« hat Recht: Für alles gibt es eine kausale Erklärung, also auch für menschliches Handeln. Der freie Wille ist eine Illusion.
3. Man versucht, beide Standpunkte trotz ihrer Gegensätzlichkeit zu versöhnen.

Für die erste Lösung spricht immerhin die unmittelbare Erfahrung spontanen Handelns. In ihrer radikalen Form kann sie allerdings nur ein Größenwahnsinniger vertreten, der sich für allmächtig hält. Selbst ein unbedingter Verteidiger der Willensfreiheit wird zugeben, dass er nicht absolute Willkür meint, sondern Handlungsfreiheit innerhalb gewisser – meist enger – Grenzen. Damit gibt er sich aber als Vertreter der hochproblematischen dritten Lösung zu erkennen.

Die Perspektive der dritten Person

Für Variante zwei spricht die vernünftige Annahme, dass es in der Welt mit rechten Dingen zugeht, also keine Wirkung ohne natürliche Ursache eintritt. Dieser »Satz vom zureichenden Grund« hat in der Philosophie eine ehrwürdige Tradition, und die Naturwissenschaft ist mit ihrer Ursachenforschung unterdessen so weit gekommen, dass es nicht vermessen ist, zu fordern, man möge für alles einen wissenschaftlich soliden Grund angeben.

Die davon abgeleitete Behauptung, da alles naturgesetzlich determiniert ist, sei Willensfreiheit nur eingebildet, wird gegenwärtig von den Hirnforschern Wolf Singer und Gerhard Roth besonders öffentlichkeitswirksam vertreten. Je mehr die Neurowissenschaften über bewusste und unbewusste Hirnprozesse in Erfahrung bringen, desto enger scheint sich der Spielraum für ein autonomes, frei agierendes Ich zusammenzuziehen. Anscheinend erleben wir gerade, wie die Dritte-Person-Perspektive in Gestalt der Hirnforschung die erste Person aus ihrem letzten Refugium, dem eigenen Kopf, verdrängt. Konsequenterweise fordern Roth und Singer, aus dem Strafrecht Begriffe wie Verantwortung, Schuld und Strafe zu tilgen; was dann bleibt, ist Social Engineering, die Behandlung sozial schädlichen Verhaltens mit dem Ziel, es zu korrigieren oder wenigstens die Gesellschaft vor seinen Folgen zu schützen.

Aber auch Variante zwei genügt nicht. Sie gibt einfach keine Beschreibung dessen, was wir erleben. In einer auf Erfahrung gegründeten Welterklärung sollte auch eine Erklärung für die tagtägliche Erfahrung, dass wir zwischen Handlungsalternativen wählen, vorkommen; das sollte uns nicht als pure Illusion ausgeredet werden. Es klingt wie ein Witz, wenn jemand kommt und sagt: Ich kann über mein Tun und Denken nicht frei entscheiden; ich bin nicht freiwillig hier, und dass ich das sage, geschieht auch nicht freiwillig. – Was ist der Sinn dieser Aussage? Wenn sie wahr ist, dann spricht hier ein Automat, in dem gerade Ursachen und Wirkungen ablaufen, die für ihn selbst undurchsichtig bleiben. Er kann seine Aussage über sich nicht auf Grund echter Selbsterkenntnis machen, sondern wir bekommen nur den Output eines Programms. Der Automat tut nur so, als wüsste er etwas über sich. Seine Aussage wirkt nicht glaubwürdig.

Bleibt noch die, wie gesagt hochproblematische, dritte Variante, der in der Literatur so genannte Kompatibilismus: Man versucht, das Erlebnis der Entscheidungsfreiheit kompatibel zu machen mit unserem Wissen um den in der Welt herrschenden Determinismus.

Betrachten wir einen Menschen, der eine Kaufentscheidung zu fällen hat. Der ideale homo oeconomicus weiß alles über das Angebot, kennt naturgemäß seine eigenen Bedürfnisse wie seine Westentasche, trifft eine daraus abgeleitete rationale Entscheidung und greift zu. Ist seine Entscheidung frei? Kaum. Seltsam: Nach dem Verständnis vom freien Willen, das in den philosophischen Debatten darüber herrscht, erscheint der Kunde umso freier, je gleichwertiger die Güter sind, zwischen denen er zu wählen hat – bis zu dem Extremfall von Buridans legendärem Esel, der zwischen zwei gleich weit entfernten und gleich großen Heuhaufen steht und verhungert, weil er sich nicht entscheiden kann.

Hat die heute allgemein beklagte Konsumschwäche vielleicht mit einem Mangel an psychologischer Kaufkraft, das heißt mit Kaufunlust zu tun, weil die Waren sich alle so gleichsehen? Ich zum Beispiel brauche eigentlich dringend neue Schuhe – aber auch nach stundenlangem Suchen finde ich keine, die mir gefallen, denn derzeit haben alle Schuhe vorn zwei Ecken und dazwischen eine mehr oder weniger gerade Kante, wie Schwimmflossen. Ich laufe noch immer in den alten Tretern herum. Man könnte fast meinen, der im philosophischen Sinn ganz Freie entscheidet überhaupt nichts, sondern ist wie gelähmt.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Sitzt unsere arme Seele eingesperrt hinter den Gitterstäben des ehernen Determinismus?

Der prekäre Platz für Freiheit

So steht Buridans Esel – ein entfernter Vorfahr von Schrödingers Quantenkatze, ersonnen im 14. Jahrhundert von einem französischen Scholastiker – bis zum Verhungern da als Denkmal des Determinismus: wie ein Stück Eisen zwischen zwei Magneten, ein Stück Masse zwischen zwei Planeten. Es gibt immer einen Punkt, in dem entgegengesetzte Anziehungen einander genau die Waage halten. Dort herrscht labiles Gleichgewicht: Eine winzige Auslenkung genügt und das hin- und hergerissene Objekt stürzt sich hemmungslos auf eine der Alternativen.

Die mittelalterliche Scholastik stand vor der Aufgabe, in einer von Gott geschaffenen Natur Platz für menschliche Freiheit zu schaffen. Vom Standpunkt eines allwissenden Gottes aus betrachtet ist mein Handeln völlig vor- ▷

▷ hersehbar. Aus Allwissenheit folgt scheinbar Unfreiheit. Wenn jemand schon weiß, was ich tun werde, wie kann ich dann frei sein? Dagegen wenden die Scholastiker ein: Auch wenn Gott alles weiß, kann ich doch machen können, was ich will! Selbst wenn Er alle meine Motive kennt, sind es doch meine Motive und nicht seine. Er weiß zwar alles, lässt mir aber meine Freiheit – zum Beispiel die, zu sündigen. Er schaut mir nur zu wie einer, der das Stück kennt, das da gegeben wird. Aber Er ist nicht der Strippenzieher eines Marionettenspiels.

Die absolut spontane Tat

Tatsächlich gilt Determinismus für menschliches Handeln nur im Nachhinein: Wenn ich oder sonst jemand so oder so gehandelt hat, werden in Romanen, Geschichtsbüchern oder Gerichtsgutachten nachträglich immer Gründe dafür gesucht und gefunden. Es gibt allerdings in modernen Romanen gelegentlich den »acte gratuit«, die absolut spontane Tat. In den »Verliesen des Vatikan« von André Gide stößt der junge Lafcadio einen Unbekannten aus dem Zug, um sich seine Freiheit zu beweisen, und »Der Fremde« von Albert Camus sieht sich selbst zu, wie er jemanden motivlos und automatenhaft tötet. Aber selbst solche Taten haben ihren Grund: Der Gide'sche Spontaneist entscheidet sich gezielt für die diejenige Tat, die ihm gerade am unsinnigsten oder freiesten erscheint; Camus' »Fremder« ist sich selbst fremd wie ein Automat, suspendiert die Entscheidung, lässt sich willenlos eine Tat tun. Irgendwo zwischen diesen romanhaften Extremen finden normal motivierte Entscheidungen statt.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

André Gide

Albert Camus

Der neuzeitliche Determinismus beerbt den allwissenden Gott; er nimmt das vollständige Wissen eines idealen Wissenschaftlers vorweg, der am endgültigen Ziel der Naturerklärung angekommen ist. Zwar gibt es theoretisch – theologisch oder physikalisch – einen Standpunkt, von dem aus ich völlig determiniert handle, aber dieser Ort liegt sehr weit entfernt von meinem Erleben. Es gibt dort keine Zeit, weil jede Entwicklung komplett bekannt und insofern abgeschlossen ist. Dieser Endpunkt der Physik liegt dort, wo Gott wohnt oder der Laplace'sche Dämon, der alle Kräfte und die momentane Lage aller Objekte kennt und darum die gesamte Vergangenheit und Zukunft des Universums aus den Differenzialgleichungen der Mechanik herzuleiten vermag.

Aber wir leben doch nicht im 18., sondern im 21. Jahrhundert! Was ist mit den Revolutionen der Physik seither? Hat die Quantentheorie nicht mit dem Weltbild von Newton und Laplace Schluss gemacht? Schafft Heisenbergs berühmtes Unbestimmtheitsprinzip nicht den strengen Determinismus ab und setzt an seine Stelle die bloße Wahrscheinlichkeit des einen oder anderen Messergebnisses? Lässt die so genannte Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik nicht – sehr zu Albert Einsteins Missfallen – an Stelle der »klassischen« Aussage über an sich seiende Objekte nur noch die Aussage über das aus Experimenten gewonnene Wissen um diese oder jene Eigenschaft des Quantenobjekts zu? Liegt also die moderne Physik nicht mehr oder weniger im Auge des Betrachters?

Tatsächlich hat es immer wieder Versuche gegeben, aus der Quantenphysik die Existenz eines nichtdeterminierten Bewusstseins herzuleiten. Der deutsche Physiker Pascual Jordan sah in der erlebten Spontaneität unseres Handelns einen ins Makroskopische hinein wirkenden Verstärkungseffekt mikrophysikalischer Unbestimmtheit. Der britische Neurowissenschaftler John Eccles postulierte, an den Synapsen – den Schaltstellen zwischen den Neuronen – könne der Geist im Rahmen quantenphysikalischer Wahrscheinlichkeiten die dort stattfindenden Mikroprozesse durch Einwirkung hypothetischer »Psychonen« in die gewollte Richtung lenken. Und der britische mathematische Physiker Roger Penrose vermutet gegenwärtig, die Mikrotubuli, fädige Komponenten des Zellskeletts, seien in der Lage, verschränkte Quantenvorgänge aufrechtzuerhalten und damit die Grundlage für ganzheitliche Denkvorgänge zu liefern.

Doch jeder Versuch, dem freien Willen ein Plätzchen innerhalb der modernen Physik zu reservieren, muss misslingen. Der Eindruck, die heutige Naturwissenschaft sei quasi liberaler als die klassische Mechanik, trügt. Die Heisenberg'sche Unschärfe lässt dem subjektiven Faktor nicht mehr Spielraum als der Laplace'sche Dämon – fast möchte man sagen: noch weniger. Die Quantenphysik trifft streng deterministische Aussagen über die zeitliche Entwicklung physikalischer Zustandsgrößen – und sie spricht, anders als die klassische Physik, zusätzlich einschränkende Regeln darüber aus, was wir davon in bestimmten Experimenten beobachten können. Wir gewinnen bei alldem nicht mehr Freiheit, sondern müssen uns mit prinzipiell unvollständigem Wissen über die physikalische Realität abfinden.

Diese Realität gehorcht »an sich«, das heißt als mathematisch beschriebener Entwicklungsprozess der quantenmechanischen Zustandsfunktion, bevor wir ihn experimentell beobachten, nicht weniger strengen Regeln als ein klassisches Teilchensystem. Es gibt sogar zusätzliche Zusammenhänge zwischen Teilsystemen – Stichworte dafür sind Ver-

schränkung, Kohärenz, Superposition, Nichtseparierbarkeit –, die physikalische Quantensysteme in sich womöglich noch enger determinieren als klassische Teilchenensembles. Unschärfe und Wahrscheinlichkeit kommen erst ins Spiel, wenn das Quantensystem gemessen wird – manche sagen, durch einen makroskopischen, darum »klassisch« zu beschreibenden Apparat (Kopenhagener Deutung), andere, durch das Bewusstsein des Beobachters (John von Neumann, Eugene Wigner), wieder andere, durch Aufspaltung der Welt (Everett'sche Vielweltentheorie) oder neuerdings durch »Dekohärenz«, das heißt quantenmechanische Wechselwirkung zwischen Quantenobjekt und Messapparat (H. Dieter Zeh und Wojciech H. Zurek).

Jedenfalls entspringt aus der Quantenwelt selbst nichts, was unserem Erlebnis von Bewusstsein oder Spontaneität entgegenkäme; bestenfalls bringt nach manchen – strittigen – Interpretationen der Messprozess diese Elemente von außen ins Spiel. Wenn wir aber vernünftigerweise annehmen, dass letzten Endes auch unsere Messapparate und wir selbst keinen Sonderstatus beanspruchen dürfen, sondern selbst Teil einer einzigen, letztlich quantenphysikalisch zu beschreibenden Welt sind, dann stehen wir wieder vor dem Problem, das Theologen mit dem allwissenden Gott und klassische Physiker mit dem Laplace'schen Dämon hatten: Wir sind von den Naturgesetzen nicht ausgenommen und verfügen nicht über einen von ihnen »freien« Willen.

Willensfreiheit als erhörtes Gebet

Statt Schlupflöcher in der Physik zu suchen, sollte sich der skeptische Blick darum auf den Freiheitsbegriff selbst richten. Vielleicht stimmt damit etwas nicht. Das Wort »frei« suggeriert das Fehlen von Zwang. Wenn wir frei sind, hält uns nichts gefangen. Aber sind die Naturgesetze ein Gefängnis? Ist die arme Seele eingesperrt hinter den Gitterstäben des ehernen Determinismus? Um noch einmal den theologischen Vergleich zu bemühen: Stellen wir uns die Willensfreiheit nicht vor wie ein Gebet, das ein allmächtiger Gott erhört? Wir flehen: Lass mich jetzt dies oder das tun – und Gott ändert gnädigerweise den Weltlauf. Ein vielstimmiger Chor von Milliarden Seelen verlangt immerfort Abänderungen der Kausalität – und heraus kommt ein unvorstellbares Chaos. Wenn im Straßenverkehr jeder täte, was er will, wäre mit der Freiheit der Bewegung schnell Schluss.

In der Tat fällen wir nie völlig freie, sondern immer nur bedingte Entscheidungen. Wir warten bei Rot an der Kreuzung, müssen bei Grün losfahren und haben dann eine eng begrenzte Wahl zwischen links, rechts und geradeaus. Diese Wahl ist ihrerseits bedingt durch das angestrebte Fahrziel. Philosophen diskutieren beim Problem der Willensfreiheit immer den seltenen Fall, dass wir kein Ziel verfolgen, sondern gleichsam eine völlig spontane Spritztour unternehmen: Erst wenn die Ampel auf Grün springt, entscheiden wir uns, rechts abzubiegen, obwohl wir dafür gar keinen Grund haben; nichts hätte uns gehindert, links oder geradeaus zu fahren.

Philosophen diskutieren immer den seltenen Fall, dass wir kein Ziel verfolgen, sondern eine Spritztour unternehmen

Wir stehen an der Ampel wie Buridans Esel: Die Handlungsmotive werden so gleichmäßig ausgewogen, dass zwischen ihnen ein labiles Gleichgewicht entsteht. Soll ich jetzt rechts oder links abbiegen? Eigentlich egal – aber da hupt schon das Auto hinter mir und versetzt mir gleichsam den Stoß, der mich aus dem labilen Gleichgewicht bringt. Also biege ich irgendwohin ab. Von dieser künstlich ausgedachten, ziemlich lebensfernen Art sind die Beispiele, anhand derer Philosophen den freien Willen problematisieren. Ich bin dabei ungefähr so »frei« wie eine geworfene Münze, bevor sie Kopf oder Zahl zeigt.

In wirklichkeitsnäheren Entscheidungssituationen ist es mit der Freiheit nicht so weit her. Ich bin fast immer gezwungen – obwohl oder gerade weil ich meist nicht im Gefängnis sitze –, hier und jetzt eine Wahl zwischen einigen Alternativen zu treffen, deren Konsequenzen ich nur unvollständig überblicke. Ich gleiche einem Autofahrer in einer fremden Stadt, der die Rotphase an der Ampel zu nutzen versucht, sich im Stadtplan zu orientieren, während es schon wieder Grün wird und hinten jemand ungeduldig hupt. Wüsste ich alles über die fremde Stadt, hätte ich gar kein Entscheidungsproblem: Wenn ich weiß, das Ziel liegt vorn, fahre ich natürlich geradeaus.

In Wirklichkeit ist Willensfreiheit Entscheidungszwang. Man muss sich entscheiden, obwohl man zu wenig weiß. Wäre ich allwissend, so wüsste ich alles über meine Motive, über Alternativen und Konsequenzen meiner Handlungen. Es gäbe keine Wahl. Wir aber sind genötigt, auf Grund unvollständigen Wissens zu handeln. Wir stehen vor der unübersichtlichen Situation und fällen eine Entscheidung. Das mehr oder weniger starke Schwindelgefühl beim Entschluss, notgedrungen den harten Boden der Tatsachen zu verlassen, ins Ungewisse zu springen und das Risiko einzugehen, das Falsche zu tun, ist das, was wir als unseren freien Willen erleben. ◁

Michael Springer ist Schriftsteller und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft. Er hat an der Universität Wien in theoretischer Physik promoviert.

AUTOR

IM MÄRZ-HEFT 2006 AB 21. FEBRUAR AM KIOSK

PHIL SAUNDERS, SPACE CHANNEL LTD.

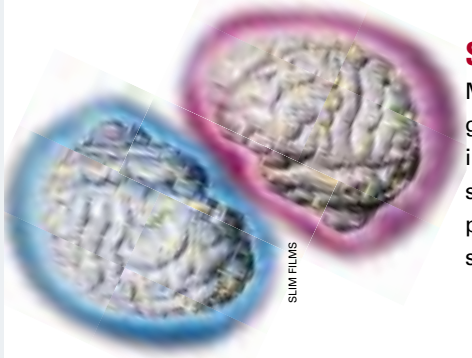
Die Schwerkraft – eine Illusion?

Ein Hologramm ist flach, spiegelt jedoch ein räumliches Bild vor. Ähnlich könnte unsere Welt in Wahrheit nur zweidimensional sein. Die dritte Dimension – einschließlich der Schwerkraft – wäre dann eine Täuschung, hervorgerufen durch die Wechselwirkungen von Teilchen und Feldern

WEITERE THEMEN IM MÄRZ

Klostermedizin

Ökowelle und esoterische Neigungen haben ihr neue Aktualität verliehen – aber worum ging es bei der Medizin im Kloster wirklich?



SLIM FILMS

Sein Hirn, ihr Hirn

Männer und Frauen sind keineswegs gleich, was Bau und Arbeitsweise ihres Gehirns anbelangt – und das sollte auch bei der Behandlung von psychischen Erkrankungen berücksichtigt werden

ROLEX AWARDS / HEINE PEDERSEN

Letzte wilde Pferde

Einst war die Familie der Pferde ein Erfolgsmodell der Evolution.
Heute sind die letzten Arten vom Aussterben bedroht – wie die Wildesel in den Wüsten Nordafrikas nahe dem Roten Meer

SCHWERPUNKT IT-TRENDS

SLIM FILMS

Morphware

Ein Chip, der sich neuen Aufgaben anpasst wie ein Chamäleon? Magnetologik macht es möglich

Übersetzer gesucht

Wie lassen sich wenige Nanometer große Schaltkreise in die Mikrowelt der Siliziumchips integrieren?

KI – quo vadis?

Wird im Jahr 2050 ein Computer denken wie ein Mensch? An der Rechenleistung wird es nicht fehlen ...